

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PRŮTOKU TEKUTIN

FLOW MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Pátek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Tomáš Pátek

ID: 186156

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku tekutin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace tepelného průtokoměru tekutin. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Vypracujte přehled nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku tekutin, přehled hlavních parazitních vlivů a přehled metod pro kalibraci snímačů průtoku.
2. Podrobně zpracujte problematiku tepelných průtokoměrů – termoanemometrů a kalorimetrických průtokoměrů - princip, konstrukce, měřicí obvody, způsoby potlačení parazitní vlivů.
3. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravek pro měření základních parametrů tepelných průtokoměrů, umožňující testování parazitních vlivů na přesnost měření průtoku.
4. Proveďte základní ověřovací měření s dostupnými vzorky snímačů a dosažené výsledky diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BAKER, R.C. Flow measurement handbook. Cambridge University Press, New York, 2000.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem tepelného snímače průtoku. V teoretické části jsou stručně popsány druhy průtoků, obecné vztahy mechaniky tekutin a různé metody měření průtoku. Druhá, praktická část této bakalářské práce se zabývá návrhem termoanemometrického snímače průtoku plynu s využitím snímače FS7 od firmy IST AG. Návrh spočívá v řadě měření s cílem určit základní vlastnosti snímače IST FS7 jako například oteplení topného tělíska při různém průtoku, přestup tepla při nulovém průtoku a základní charakteristika. Na základě měření je navržen matematický model snímače dvěma způsoby. Dále je navržena univerzální zpracující elektronika, umožňující připojení snímačů IST FS7 a IST DFOOL, s využitím vývojového kitu Texas Instruments MSP-EXP430FR2311 včetně firmware a skriptu pro program MATLAB, který provádí zpracování naměřených dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření průtoku, rychlostní průtok, návrh snímače, termoanemometr, IST FS7

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with thermal flowmeter design. In the theoretical part are briefly described flow types, general formulas of fluid mechanics and different flow measurements methods. Second practical part this bachelor thesis deals with design of thermoanemometric gas flow sensor with FS7 sensor by IST AG. Design is based on many measurements to get basic features of sensor IST FS7 like heater warming depending on flow, heat transfer in zero flow and basic characteristic. Based on measurements, it is designed mathematical model of sensor by two methods. So it is designed universal performing electronics, which can be used with IST FS7 or IST DFOOL sensors. It is based on development kit Texas Instruments MSP-EXP430FR2311. Firmware and MATLAB script which processing measured data is included.

KEYWORDS

Flow measurement, flow velocity, sensor design, thermoanemometer, IST FS7

PÁTEK, Tomáš. *Měření průtoku tekutin*. Brno, 2018, 72 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Bemeš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření průtoku tekutin“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

1	Úvod	11
1.1	Měření průtoku	11
1.1.1	Rychlostní průtok	12
1.1.2	Objemový průtok	12
1.1.3	Hmotnostní průtok	12
1.1.4	Přepočet průtoku	13
1.2	Základní parametry snímačů průtoku	13
1.2.1	Přímé měření hmotnosti nebo objemu	14
1.2.2	Průřezové průtokoměry	14
1.2.3	Plováčkové průtokoměry (rotametry)	14
1.2.4	Turbínkové a lopatkové průtokoměry	14
1.2.5	Vírové senzory průtoku (vortex)	15
1.2.6	Ultrazvukové senzory průtoku	15
1.2.7	Značkovací průtokoměry	15
1.2.8	Průtokoměry založené na Coriolisově síle	15
1.2.9	Terčíkové průtokoměry	15
1.2.10	Tepelné průtokoměry	16
2	Termoanemometry	18
2.1	Princip	18
2.2	Konstrukce	20
2.3	Měřicí obvody CTA	21
2.4	Měřicí obvody CCA	23
3	Kalorimetrické průtokoměry	24
3.1	Princip	24
3.2	Měřicí obvody	27
4	Kalibrace tepelných snímačů průtoku	29
5	Praktická část bakalářské práce	31
5.1	Vlastnosti snímače IST FS7	31
5.1.1	Měření přestupu tepla ze snímače IST FS7 do okolního vzduchu	31
5.1.2	Získávání koeficientů matematického modelu snímače	37
5.1.3	Měření přestupu tepla při nulovém průtoku	44
5.1.4	Měření vlivu teploty topného tělíska a průtoku na snímač teploty	48
5.1.5	Závěr z měření	51
5.2	Návrh HW	58

5.2.1	Návrh HW IST FS7	58
5.2.2	Návrh HW IST DFOOL	60
5.2.3	Ověření výsledného návrhu	63
5.3	Návrh SW	63
5.3.1	Komunikační protokol	65
5.3.2	Popis programu mikrořadiče s regulací na konst. ΔT	65
5.3.3	Popis programu mikrořadiče s regulací na konst. T_H	66
5.3.4	Popis skriptu programu MATLAB	66
5.4	Alternativa s regulací na konstantní hodnotu	67
6	Závěr	69
	Literatura	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Porovnání různých parametrů snímačů (Kadlec, 2006)	17
2.1	Drátkový termoanemometr	20
2.2	Třídimenzionální drátkový termoanemometr (CTAprobe2014, 2017) . .	21
2.3	Termoanemometr napařený na keramické destičce a Termoanemometr IST FS5 (IST FS5, 2017)	21
2.4	Wheatsonův můstek pro CTA	22
2.5	Wheatsonův můstek pro CTA s kompenzací vlivu teploty	22
2.6	Principiální schéma CCA	23
2.7	Můstkové zapojení CCA	23
3.1	Princip funkce kalorimetrického průtokoměru (IDTZSSC3154 Application Note, 2016)	24
3.2	Dvouosý MEMS kalorimetrický průtokoměr (Zhu, 2014)	25
3.3	Kalorimetrický průtokoměr s vně umístěnými snímači a topným tělískem (Lipták, 2003)	26
3.4	Snímač se třemi topnými tělisky (Baker, 2016)	26
3.5	Snímač s dvěma topnými tělisky (Baker, 2016)	26
3.6	Snímač s topným tělískem umístěným po proudu (Baker, 2016)	27
3.7	Ideové zapojení kalorimetrického průtokoměru	27
3.8	Diferenciální zapojení snímače FS1012 (FS1012 Datasheet, 2017) . . .	28
4.1	Metoda zvonu (Orlíková, 2001)	30
5.1	Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 24^\circ\text{C}$	35
5.2	Součinitel přestupu tepla způsobený vedením při $T_0 = 24^\circ\text{C}$	35
5.3	Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$	36
5.4	Porovnání závislostí součinitele přestupu tepla λ na průtoku v	36
5.5	Sestava při druhém měření pro získání koeficientů matematického modelu snímače	41
5.6	Umístění snímače IST FS7 a snímače teploty média	42
5.7	Závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 (T_H) při teplotě okolí $T_0 = 26^\circ\text{C}$	43
5.8	Závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 při různé teplotě okolí T_0	43
5.9	Závislost příkonu P na ΔT_0 pro různé teploty okolí T_0	47
5.10	Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$	47
5.11	Závislost chyby snímače teploty na ΔT_S	48

5.12	Porovnání určeného matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů s naměřenými závislostmi	51
5.13	Relativní chyba určeného matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů	53
5.14	Závislost součinitele teplotní vodivosti vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)	54
5.15	Závislost kinematické viskozity vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)	54
5.16	Závislost Prandtlova čísla vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)	55
5.17	Experimentálně zjištěná závislost parametrů A a B matematického modelu snímače na T_0	55
5.18	Teoretická závislost parametrů A a B matematického modelu snímače na T_0	56
5.19	Závislost výstupu ADC na teplotě topného tělíska T_H nebo snímače teploty T_S	59
5.20	Schéma zapojení modulu pro vývojový kit MSP-EXP430FR2311 . . .	60
5.21	Modul pro vývojový kit MSP-EXP430FR2311	61
5.22	Modul s nasunutým vývojovým kitem MSP-EXP430FR2311	62
5.23	Detail konektorového hřebínku s navoleným snímačem IST FS7 . . .	62
5.24	Závislost $P\Delta T^{-1}$ na průtoku v	63
5.25	Závislost příkonu topného tělíska při vyhřívání na teplotu 50°C při teplotě okolí 25,7°C	68

SEZNAM TABULEK

4.1	Normální podmínky dle NIST	29
5.1	Naměřené hodnoty při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$	32
5.2	Naměřené hodnoty při teplotě média $T_0 = 24^\circ\text{C}$	33
5.3	Naměřená závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 při teplotě okolí $T_0 = 26^\circ\text{C}$ (1. měření)	38
5.4	Naměřená závislost příkonu P na průtoku pro $\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$ při různé teplotě okolí T_0 (2. měření)	39
5.5	Naměřená závislost příkonu P na průtoku pro $\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$ při různé teplotě okolí T_0 (2. měření)	40
5.6	Naměřené hodnoty oteplení ΔT_0 při různém příkonu P pro různé teploty okolí T_0	45
5.7	Naměřené hodnoty vlivu teploty topného tělíska T_H na snímač teploty	49
5.8	Absolutní a relativní chyba matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů	52
5.9	Porovnání naměřených hodnot a vypočítaných hodnot pomocí mo- delu získaného proložením naměřených hodnot	57
5.10	Navržené hodnoty rezistorů pro snímač IST FS7	58
5.11	Navržené hodnoty rezistorů pro snímač IST DFOOL	61
5.12	Porovnání Nominálních a skutečných hodnot	63
5.13	Tabulka naměřených hodnot pro snímač IST FS7 s navrhnutým HW	64
5.14	Naměřené hodnoty příkonu topného tělíska při vyhřívání na teplotu 50°C při teplotě okolí $25,7^\circ\text{C}$	67

1 ÚVOD

1.1 Měření průtoku

Měření průtoku tekutin je v praxi významný a značně rozšířený proces zejména v (Crabtree, 2009):

- potravinářství a pivovarnictví
- medicíně
- hornictví a metalurgii
- transportu tekutin
- petrochemickém průmyslu
- pneumatickém a hydraulickém transportu pevných částí
- výrobě energie
- papírnictví
- distribuci

Měřené tekutiny mají rozdílné vlastnosti. Mohou to být kapaliny nebo plyny, stlačitelné, či nestlačitelné. Mohou mít například různou viskozitu a teplotu nebo další specifika jako výbušnost či chemickou agresivitu.

Při měření průtoku je nutné uvážit chování proudící tekutiny. Proudění může být laminární (tzv. proudnicové), nebo turbulentní. Laminární proudění je takové, kdy se tekutina ve středu protékaného kanálu pohybuje rychleji než tekutina po stranách protékaného kanálu. Nedochozí k mísení tekutiny mezi proudnicemi. Oproti tomu u turbulentního proudění dochází ke vzniku vírů a k mísení tekutiny mezi proudnicemi. Pro měření průtoku je ve většině případů vhodnější laminární proudění. Hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním udává Reynoldsovo číslo, které dává do vztahu viskozitu a setrvačné síly. Pro Reynoldsovo číslo platí vztah: (Smol'yakov, 1983)

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad [-] \quad (1.1)$$

v_s	střední rychlost proudění	$[\text{ms}^{-1}]$
d	průměr měrného kanálu	$[\text{m}]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$

Při velikosti Reynoldsova čísla $Re < 2300$ lze jednoznačně hovořit o proudění laminárním pro uzavřené kanály, při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla se jedná o proudění turbulentní, přičemž nelze přesně určit hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. (Smol'yakov, 1983) Další nepříjemnost při měření průtoku

stlačitelných tekutin je chování těchto látek připomínající pružinu a neplatnost Pascalova zákona, což může způsobit turbulence a nestálost průtoku.

Rozeznáváme různé definice průtoku.

1.1.1 Rychlostní průtok

Rychlostní průtok je definován jako střední rychlost částic proudění v definovaném průřezu.

$$v_s = \frac{ds}{dt} \quad [ms^{-1}] \quad (1.2)$$

s	dráha částice	[m]
t	čas	[s]

1.1.2 Objemový průtok

Objemový průtok je definován jako objem tekutiny, který proteče daným průřezem za určitý čas.

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad [m^3s^{-1}] \quad (1.3)$$

V	objem proteklé tekutiny	$[m^3s^{-1}]$
t	čas	[s]

1.1.3 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok je definován jako hmotnost tekutiny, která proteče daným průřezem za určitý čas.

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad [kgs^{-1}] \quad (1.4)$$

m	hmotnost proteklé tekutiny	[kg]
t	čas	[s]

Hmotnostní průtok má v průmyslu a obchodu velký význam, protože nese informaci o výhřevnosti protékané látky.

1.1.4 Přepočet průtoku

Průtoky lze za daných podmínek přepočítat. Pro nestlačitelné kapaliny platí:

$$\begin{aligned}Q_m &= \rho \cdot Q_V = \rho \cdot S \cdot v_s \\Q_V &= \frac{Q_m}{\rho} = S \cdot v_s\end{aligned}\tag{1.5}$$

ρ	hustota tekutiny	[kg/m ³]
S	průřez měřicího kanálu	[m ²]

Pro plyny nelze použít tyto jednoduché vztahy, protože v závislosti na tlaku a teplotě se mění objem plynu, a proto je nutné uvažovat stavovou rovnici ideálního plynu:

$$pV = nRT\tag{1.6}$$

p	tlak plynu	[Pa]
V	objem plynu	[m ³]
n	látkové množství	[mol]
R	molární plynová konstanta	[J K ⁻¹ mol ⁻¹]
T	Termodynamická teplota	[K]

1.2 Základní parametry snímačů průtoku

Mezi základní parametry snímačů průtoku patří:

- přesnost
- opakovatelnost
- linearita
- rozsah měřeného průtoku
- typ měřeného průtoku
- pracovní rozsah teplot
- maximální pracovní tlak
- tlaková ztráta
- napájecí napětí
- spotřeba
- požadavky na zpracování, výstup
- odolnost proti agresivním látkám

- způsob montáže

Pro snímače průtoku jsou charakteristické tyto nejistoty měření:

- nejistoty způsobené typem průtoku, z čehož vyplývá, že nejistota je ovlivněná délkou usměrňujícího potrubí před a za snímačem
- nejistoty způsobené změnou fyzikálních vlastností měřeného média
- nejistoty vyplývající z použitého fyzikálního principu měření
- obecné nejistoty měření

1.2.1 Přímé měření hmotnosti nebo objemu

Velmi přesné měření vhodné pro fakturační měřidla. Vychází přímo ze vztahu pro výpočet hmotnostního nebo objemového průtoku, kdy je přímo měřená hmotnost nebo objem protékané tekutiny za určitý čas.

1.2.2 Průřezové průtokoměry

Průřezové průtokoměry zaškrcují protékaný kanál, tím dochází k tlakové diferenci před a za škrtícím členem. Rozdíl tlaku mezi těmito body je poté měřený pomocí diferenčního tlakoměru a je závislý na rychlosti proudění tekutiny v kanálu. Výsledný průtok lze pak odvodit z Bernoulliho rovnice. Škrtícím členem může být clona, dýza, Venturiho trubice, zvláštní případ je koleno, kdy tlak je měřen na jeho vnitřní a vnější straně.

1.2.3 Plováčkové průtokoměry (rotametry)

Proud tekutiny nazdvihuje plováček, který se pohybuje v kónické trubici. Tím dojde ke zvětšení šterbiny kolem plováčku. K ustálení dojde po vyrovnání tlakové síly způsobené protékáním médiem a tíhové síly zmenšené o vztlak. Rotametry měří objemový průtok.

1.2.4 Turbínkové a lopatkové průtokoměry

Průtokoměry měřící rychlostní průtok. Proudící tekutina působí na vhodně uspořádané lopatky tělesa, které způsobují jeho otáčivý pohyb. Je-li osa rotace průtokoměru ve směru proudění, jedná se o turbínkový průtokoměr. Je-li osa rotace průtokoměru kolmá na směr proudění, jedná se o lopatkový průtokoměr. Zvláštním případem je miskový anemometr využívaný v meteorologii, kde mají lopatky tvar misek.

1.2.5 Vírové senzory průtoku (vortex)

Do protékaného kanálu je vložena vhodně tvarovaná překážka, která vyvolá oscilační pohyb tekutiny. Za překážkou vznikají střídavě víry, které jsou snímány vhodným snímačem. Frekvence těchto vírů je pak závislá na rychlosti proudění tekutiny před překážkou.

1.2.6 Ultrazvukové senzory průtoku

Senzory měřící rychlostní průtok, dělí se na dva typy.

Ultrazvukové senzory založené na době letu

Ultrazvukové vlny jsou vysílány šikmo protékaným kanálem a unášeny proudící tekutinou. Měří se čas, za který zvukový signál projde od vysílače přes tekutinu k přijímači. Pro vyšší citlivost se zvukové vlny vysílají v obou směrech. Výsledný rozdíl časů je závislý na rychlosti průtoku.

Ultrazvukové senzory založené na Dopplerově jevu

Snímače vysílají ultrazvukový signál o určité frekvenci a měří se frekvence odražená od nehomogenit v tekutině. Výsledná rychlost se určuje na základě Dopplerova jevu.

1.2.7 Značkovací průtokoměry

V proudící tekutině je vytvořena značka. Měří se čas, za který značka unášena tekutinou urazí vzdálenost mezi dvěma body. Ze známosti vzdálenosti mezi těmito body a změřeného času lze vypočítat rychlost proudění.

1.2.8 Průtokoměry založené na Coriolisově síle

Trubka ukotvená na dvou krajních bodech je rozkmitávána a je snímána její poloha ve dvou bodech umístěných ve stejné vzdálenosti od místa uchycení. Protékající tekutina, na kterou působí Coriolisova síla, zapříčiní, že kmity nejsou symetrické a z výchylek v daných bodech lze určit velmi přesně hmotnostní průtok nezávisle na teplotě, viskozitě, tlaku nebo homogenitě tekutiny.

1.2.9 Terčíkové průtokoměry

Proudící médium deformuje svou kinetickou energií deformační prvek. Míra deformace tohoto prvku je závislá na rychlosti proudění.

1.2.10 Tepelné průtokoměry

Měří hmotnostní průtok, dělí se na dva typy. Lze mezi ně zahrnout i speciální druh značkovacích průtokoměrů využívající tepelnou značku.

Termoanemometry

Uvnitř protékaného kanálu je umístěno topné tělísko. Princip spočívá v měření odebraného tepla tomuto tělísku proudícím médiem.

Kalorimetrické průtokoměry

Někdy zvané diferenční termoanemometry. Uvnitř protékaného kanálu je umístěno topné tělísko a dva snímače teploty umístěné v okolí tělíska na protilehlých stranách. Protékané médium přenáší teplo z topného tělíska na snímače při nenulovém průtoku nesymetricky.

Metoda	Typ průtokoměru	Blíže specifikace snímače	Výstup	Tlaková ztráta	Přesnost (procenta z měřícího rozsahu)	Rozsah průtoků (m ³ /h)	Poměr Q_{max}/Q_{min}	Použití
objemová	objemová měřidla	s nespojitou funkcí (zvonový krychloř)	lineární	–	lepší než 0,1	10^{-3} až 10^2	–	vhodné pro plyny a čisté a neviskózní kapaliny, zejména jako etalon
		se spojitou funkcí (membránový a bubnový plynoměr, pístové měřidlo, oválový průtokoměr)	lineární	střední až velká	0,1 až 2	10^{-3} až 10^3	100 : 1 až 200 : 1	především jako měřidla protékého množství, bilanční měřidla
rychlostní	průtokoměry s měřením rozdílu tlaků	rychlostní sondy (trubice Pitotova, Prandtlůva; několikaúrovňové sondy)	odmocnina	malá	2 až 5	1 až 10^3	3 : 1 až 10 : 1	rychlostní sondy jsou vhodné k jednorázovému měření; několikaúrovňové sondy jsou vhodné i pro velmi rozměrná potrubí
		průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho dýza)	odmocnina	střední až velká	0,5 až 2	10^{-4} až 10^3	4 : 1 až 8 : 1	dříve nejrozšířenější v průmyslu; nyní na ústupu ve prospěch průtokoměrů vírových, ultrazvukových atd.
		kapilární průtokoměry (laminární)	lineární	velká	0,5 až 5	10^{-5} až 10	100 : 1	zejména pro laboratorní měření
		kolenové průtokoměry	odmocnina	bez přidavné tlakové ztráty	5 až 10	10 až 10^3	3 : 1	jednoduché měřidlo, ale s velkou nejistotou
	rotametry (plováčkové průtokoměry)	–	přibližně lineární	střední	0,5 až 5	10^{-4} až 10^3	10 : 1	vhodné pro laboratorní i provozní použití; měřicí trubice musí být svislá
	náporové (deformační) průtokoměry	terčíkové průtokoměry	odmocnina	střední až velká	5	1 až 10^4	50 : 1	vhodné k měření znečištěných, korozivních a viskózních tekutin
	turbínové a lopatkové průtokoměry	axiální průtokoměry (šroubový, turbínový)	lineární	velká	0,1 až 2	10^{-4} až 10^3	20 : 1	vhodné k měření i za vysokých tlaků a teplot; neměří od nulového průtoku
		radiální průtokoměry (jedno- či několikaúrovňový lopatkový průtokoměr)	lineární	velká	0,1 až 2	10^{-4} až 10^3	10 : 1	měření množství užitkové i pitné vody; neměří od nulového průtoku
	elektromagnetické indukční průtokoměry	–	lineární	žádná	0,5 až 2	10^{-3} až 10^5	30 : 1 až 100 : 1	pouze k měření elektricky vodivých kapalin; vliv teploty je zanedbatelný; necitlivé na změny hustoty, viskozity a tlaku; lze měřit obousměrně
	ultrazvukové průtokoměry	založené na Dopplerově jevu	lineární	žádná	1 až 3	10^{-3} až 10^4	30 : 1	měřené médium musí obsahovat částice odrážející zvuk; vhodné k měření kalů a znečištěných tekutin
		vyhodnocující dobu šíření ultrazvukového signálu	lineární	žádná	0,1 až 1	10^{-3} až 10^4	30 : 1	náročné na technické provedení; obtížná kalibrace; nezasahuje do proudu média; lze dodatečně instalovat na povrch potrubí i měřit obousměrně
	vírové průtokoměry	–	lineární	střední	0,5 až 1	10^{-1} až 10^4	20 : 1 až 50 : 1	frekvenční výstup se snadno zpracovává číslicově; nevhodné pro malé průtoky; typická náhrada klasických průřezových měřidel
	značkovací průtokoměry	průtokoměry s uměle vytvořenou značkou	lineární	žádná	0,1 až 1	–	1 000 : 1	vhodné pro kalibraci instalovaných průtokoměrů; lze měřit průtok i v potrubí složitých tvarů; nevhodné pro průběžné měření
		korelační průtokoměry	lineární	žádná	1	–	100 : 1	použitelné tam, kde ostatní metody selhávají; nevýhodou je složitě zařízení i zpracování signálu
	přepady, žlaby	měřicí přepad	odmocnina	malá	2 až 5	10^{-1} až 10^4	400 : 1	měření průtoku kapalin v otevřených kanálech
		Parshallův žlab	odmocnina	malá	2 až 5	10^{-1} až 10^5	120 : 1	
hmotnostní	Coriolisovy průtokoměry	se zakřivenou trubicí	lineární	střední	0,1 až 0,5	1 až 10^3	50 : 1 až 500 : 1	nezávislé na změnách tlaku, teploty, viskozity, hustoty a vodivosti média
		s přímou trubicí	lineární	minimální	0,5 až 2			
	tepelné průtokoměry	hmotnostní termoanemometry	odmocnina	střední	0,5 až 2	10^{-4} až 1	50 : 1	vhodné i k měření velmi malých průtoků v laboratorní i provozní praxi
		kalorimetrické hmotnostní průtokoměry	lineární v omezené oblasti	velká	0,5 až 2	10^{-5} až 1	100 : 1	

Obr. 1.1: Porovnání různých parametrů snímačů (Kadlec, 2006)

2 TERMOANEMOMETRY

Termoanemometry (v anglické literatuře nazývané HOT WIRE PROBES, případně HOT FILM PROBES) jsou průtokoměry měřící hmotnostní průtok, použitelné jsou do průtoků řádově 10^{-4} až $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ a pracují s přesností 0,5 - 2%. (Kadlec, 2006) Principiálně je tvoří topné tělísko, senzor teploty tekutiny a senzor teploty topného tělíska. Termoanemometry mohou pracovat v režimu, kdy je proud topným tělískem konstantní (CCA z anglického constant current anemometer), nebo je teplota topného tělíska konstantní, případně rozdíl teplot tělíska a tekutiny (CTA z anglického constant temperature anemometer).

2.1 Princip

Termoanemometry pracují na principu přenosu tepla do proudící tekutiny a tím chlazení topného tělíska. Při zanedbání procesu výměny tepla v blízkosti topného tělíska lze přenos tepla z tělíska popsat vztahem: (Smol'yakov, 1983)

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad [-] \quad (2.1)$$

d	průměr žhaveného drátku (topného tělíska) [m]	
α	součinitel přestupu tepla	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
λ	tepelná vodivost	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$

Nusseltovo číslo Nu popisuje poměr mezi konvektivním a konduktivním přenosem tepla a je funkcí Reynoldsova čísla (číslo určující charakter proudění, zda je laminární či turbulentní) a Prandtlova čísla (číslo popisující, zda převládá konduktivní, či konvektivní přenos tepla v tekutině). (Smol'yakov, 1983)

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad [-] \quad (2.2)$$

d	průměr žhaveného drátku (topného tělíska) [m]	
v_s	střední rychlost proudění	$[\text{ms}^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (2.3)$$

μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa s}]$
c_p	měrná tepelná kapacita	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

Závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově a Prandtlově čísle lze získat empiricky, například: (Smol'yakov, 1983)

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \quad (2.4)$$

nebo: (Baker, 2016)

$$Nu = \frac{1}{\pi} + \frac{2^{0.5}}{\pi} Pr^{0.5} Re^{0.5} \quad (2.5)$$

Jouleovo teplo Q_J vzniklé na topném tělisku lze vypočítat podle vztahu:

$$Q_J = R_H I_H^2 t \quad [J] \quad (2.6)$$

R_H	elektrický odpor topného těliska	$[\Omega]$
I_H	proud topným těliskem	$[A]$
t	čas, po který působí I_H	$[s]$

Teplo odevzdané z těliska v podobě žhaveného drátu délky l proudící tekutině lze vypočítat ze vztahu: (Smol'yakov, 1983)

$$Q_H = \frac{\alpha \Delta T \pi dl}{t} \quad (2.7)$$

ΔT rozdíl termodynamické teploty žhaveného drátu a proudící tekutiny

Kombinací vztahů 2.1, 2.6 a 2.7 vznikne vztah nazývaný Kingův zákon:

$$R_H I_H^2 = \lambda \pi l \Delta T Nu \quad (2.8)$$

Substitucí lze pak získat vztah: (Smol'yakov, 1983)

$$P_H = R_H I_H^2 = (A + Bv^{0.5})\Delta T \quad (2.9)$$

kdy

$$A = 0,42\lambda\pi l Pr^{0.2} \quad (2.10)$$

$$B = 0,57\lambda\pi l Pr^{0.33}\left(\frac{d}{\nu}\right)^{0.5} \quad (2.11)$$

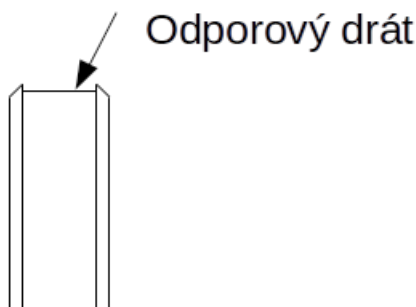
v rychlost proudění média

Získání koeficientů A a B by mělo být experimentální pro konkrétní případ z těchto důvodů: (Smol'yakov, 1983)

- Vztah 2.4 je pouze aproximace experimentálně zjištěné závislosti.
- Reynoldsovo číslo nelze naprosto přesně určit.
- Fyzikální vlastnosti materiálů se mohou lišit od tabulkových hodnot.
- Teplota topného tělíska a její rozložení je ovlivněno přívodními vodiči.

2.2 Konstrukce

Konstrukce se skládá ze snímače teploty proudící kapaliny sloužící pro teplotní kompenzaci, který nesmí být zahříván topným tělískem. Proto se umísťuje před topné tělísko (proti proudu tekutiny) nebo vedle topného tělíska v dostatečné vzdálenosti. Topné tělísko, bývá vyrobeno z vhodného kovového materiálu, například platiny nebo vhodného polovodiče. Topné tělísko může mít podobu odporového drátu nataženého mezi dvěma jehlovými hroty.



Obr. 2.1: Drátkový termoanemometr

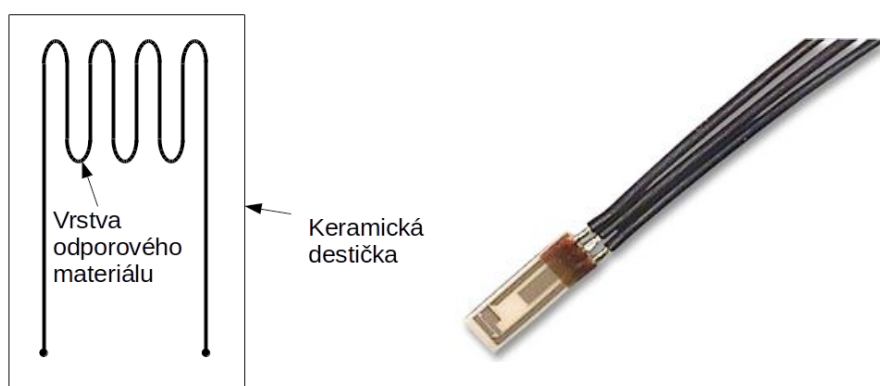
Pro zajištění nesměrovosti takového snímače lze využít kombinaci až tří různě natočených elementů pro třídimenziální snímač.

Jinou možností jsou topná tělíska napařovaná na keramickou destičku, případně trubičku. Aby bylo zabráněno ohřívání kompenzačního senzoru topným tělískem, musí mít keramika nízkou tepelnou vodivost. Takovéto snímače jsou směrové.

Další variantou jsou masivní topná tělíska z kovu či polovodiče. Mohou mít podobu kovového válečku, kónusu nebo jiného vhodného tvaru, který může být pro zlepšení vlastností potažen platinou nebo zlatem. Do této kategorie lze zařadit i termoanemometr využívající prostý perličkový termistor.



Obr. 2.2: Třidimenzionální drátkový termoanemometr (CTAprobe2014, 2017)



Obr. 2.3: Termoanemometr napařený na keramické destičce a Termoanemometr IST FS5 (IST FS5, 2017)

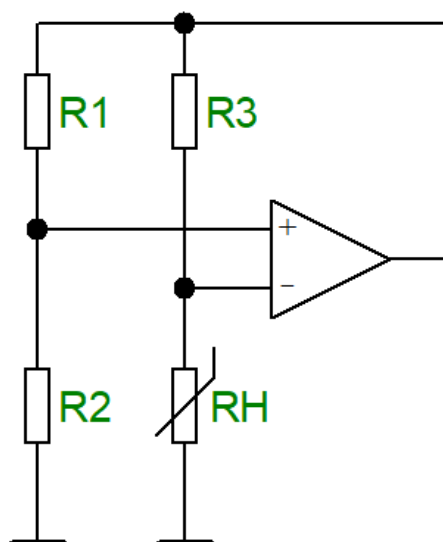
Před samotným snímačem může být instalováno zařízení pro úpravu rychlostního profilu proudění.

2.3 Měřicí obvody CTA

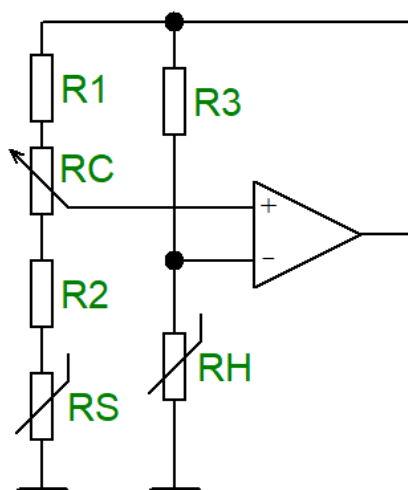
Měřicí obvod udržuje konstantní teplotu tělíska, případně konstantní rozdíl mezi teplotou tělíska a teplotou okolí při prvotní kompenzaci vlivu teploty. Nosnou veličinou informace o průtoku je akční zásah regulátoru, případně vyvážení můstku.

Časté principiální zapojení tvoří Wheatstonův můstek (obr. 2.4), takový můstek je v rovnováze, když platí $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_H}$. Rozváženost můstku snímá operační zesilovač, jehož výstup reguluje napětí na můstku, a tím kompenzuje ochlazování senzoru. Takové zapojení neprovádí kompenzaci vlivu teploty, tu je nutné případně provádět numericky při dalším zpracování (např. mikroprocesorem).

Umístíme-li do větve s rezistory R_1 nebo R_2 nastavitelný rezistor RC (odpo-



Obr. 2.4: Wheatsonův můstek pro CTA



Obr. 2.5: Wheatsonův můstek pro CTA s kompenzací vlivu teploty

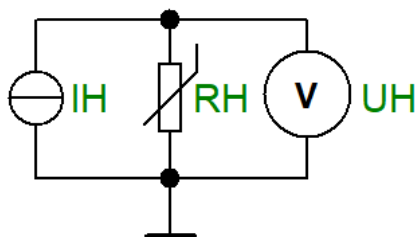
rový trimr, potenciometr), můžeme pomocí tohoto proměnného prvku nastavovat požadovanou teplotu tělíska a provádět kalibraci snímače.

Teplotní kompenzaci získáme modifikací zapojení zobrazenou na obr. 2.5, kdy do můstku připojíme kompenzační snímač měřící teplotu měřeného média. Operační zesilovač reguluje napětí na můstku tak, aby byl konstantní rozdíl mezi teplotou topného tělíska a měřeného média.

Za výstup operačního zesilovače lze zapojit výkonový prvek, tranzistor, který bude řídit napětí na můstku. Další možností je připojit PWM modulátor a napětí na můstku řídit pomocí PWM. Tato metoda je vhodnější pro snímače s většími časovými konstantami.

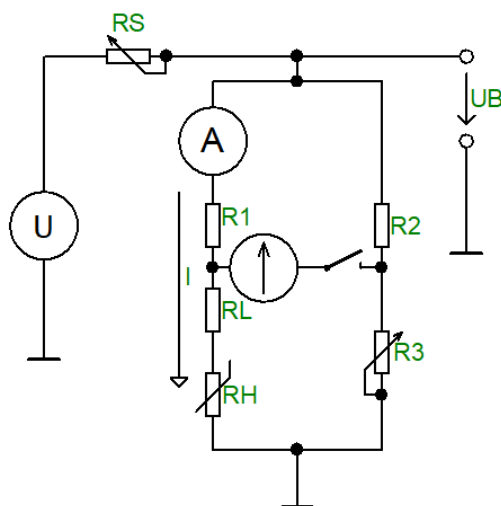
2.4 Měřicí obvody CCA

Měřicí obvod udržuje konstantní proud topným tělískem. Nosnou veličinou informace o průtoku je teplota topného tělíska, která se projevuje jako odpor topného tělíska. Protože topným tělískem protéká konstantní známý proud, velikost odporu lze kvantifikovat z napětí na topném tělísku pomocí Ohmova zákona $R_H = \frac{U_H}{I_H}$. S výhodou můžeme použít tří nebo čtyřvodičové zapojení pro měření odporu topného tělíska.



Obr. 2.6: Principiální schéma CCA

Bruun (1996) zmiňuje můstkové zapojení CCA. Aby byl můstek vybalancovaný, musí platit: $\frac{R_L + R_H}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$. V takovém případě galvanometr ukazuje nulovou výchylku. Při kalibraci se udržuje konstantní proud I můstkem a změnou odporu R_3 se nastavuje rovnováha v můstku.



Obr. 2.7: Můstkové zapojení CCA

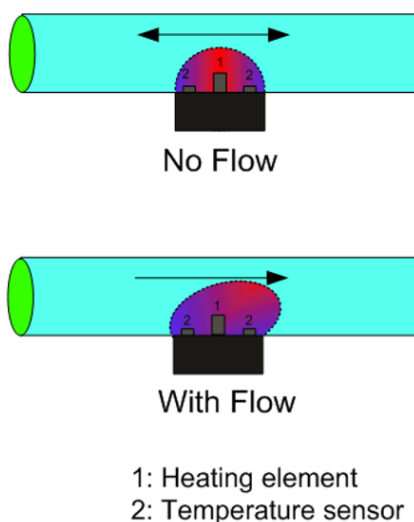
Více praktických zapojení zmiňuje ve svých skriptech Sensorové systémy Ing. Miroslav Husák, CSc. (1993).

3 KALORIMETRICKÉ PRŮTOKOMĚRY

Kalorimetrické průtokoměry, někdy zvané diferenční termoanemometry, jsou průtokoměry měřící hmotnostní průtok. Použitelné jsou obecně pro menší průtoky než termoanemometry, řádově $10^{-5} - 1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, a pracují s přesností $0,5 - 2\%$. (Kaldlec, 2006) Jsou tvořeny topným tělískem, které ohřívá laminárně proudící tekutinu, a dvěma senzory teploty tekutiny po obou stranách topného tělíska. Výsledná hodnota průtoku se vyhodnocuje diferenciálně pomocí dvou senzorů teploty, a tím dochází ke kompenzaci vlivu teploty tekutiny.

3.1 Princip

Kalorimetrické průtokoměry pracují na principu přenosu tepla měřeným médiem. Topné tělísko předává tepelnou energii kondukcí protékané tekutině, ta přenáší převážně konvekcí teplo k snímači teploty, kde dojde opět kondukcí k zahřátí snímače teploty. Je-li průtok nulový a jsou-li snímače teploty umístěny symetricky kolem topného tělíska, dochází k rovnoměrnému šíření tepla na obě strany a shodnému ohřevu obou snímačů. Zvýší-li se průtok protékané tekutiny, dojde k podpoření konduktace v jednom směru, a proto je snímač teploty umístěný po směru proudění od topného tělíska ohříván více než snímač umístěný v protisměru proudění od topného tělíska, jak je znázorněno na obrázku 3.1. (IDTZSSC3154 Application Note, 2016)



Obr. 3.1: Princip funkce kalorimetrického průtokoměru (IDTZSSC3154 Application Note, 2016)

Protože dochází ke dvěma protichůdným jevům, se zvětšujícím se průtokem je jeden snímač teploty zahříván méně a druhý více, lze výstup těchto snímačů vyhodno-

covat diferenciálně. Tím dojde k dvojnásobnému zvýšení citlivosti, a protože na oba snímače působí parazitní vlivy teploty přibližně ve stejné míře, dochází také ke kompenzaci těchto vlivů. V omezeném rozsahu je závislost výstupního signálu na hmotnostním průtoku Q_m lineární a platí: (Baker, 2016)

$$Q_m = \frac{P}{Ac_p \Delta T} \quad (3.1)$$

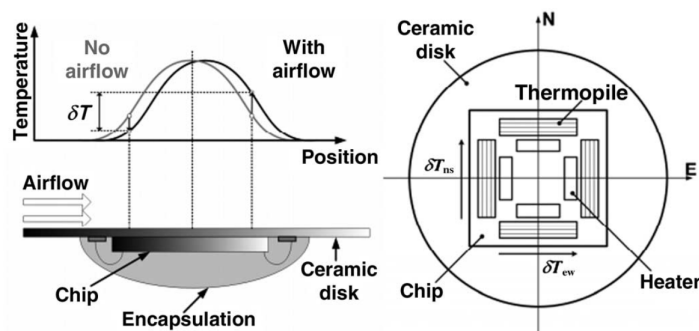
A	konstanta	[-]
c_p	tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
P	tepelný příkon	[J s ⁻¹]
ΔT	rozdíl teplot naměřený teplotními snímači	[K]

Existují dvě různé konstrukce v závislosti na místě měření:

- v přímém kanálu - senzory a tělísko jsou umístěny v jednom hlavním kanálu.
- v obtokové kapiláře - senzory jsou umístěny v tenké obtokové kapiláře, která má průměr (0.2 - 0.9 mm), díky dostatečné délce takové kapiláry je dosaženo čistě laminárního průtoku. Pro zachování konstantního poměru průtoku kapilárou a hlavním kanálem musí být i v hlavním kanálu laminární proudění, toho lze dosáhnout laminarizačním prvem. (Baker, 2016)

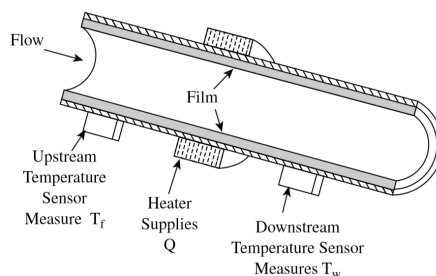
Klasická konstrukce kalorimetrického průtokoměru spočívá v umístění senzorů a topného tělíska přímo do měrného kanálu, kde musí čelit proudění a proudící tekutině, což zvyšuje jejich namáhání a hrozí jejich poškození. Také potrubí je narušeno a hrozí nebezpečí úniku měřené tekutiny. (Lipták, 2003)

Do takové kategorie spadají i MEMS (MicroElectroMechanical Systems) kalorimetrické průtokoměry. Na obrázku 3.2 je zobrazený dvouosý MEMS snímač vyvinutý v TU Delft.



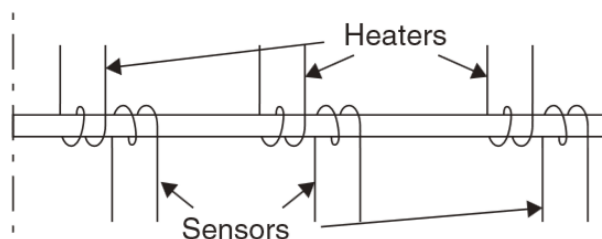
Obr. 3.2: Dvouosý MEMS kalorimetrický průtokoměr (Zhu, 2014)

Alternativa ke klasické konstrukci kalorimetrického průtokoměru je zobrazena na obrázku 3.3. Snímač a topné tělísko jsou umístěny vně měrného kanálu a teplo je do měřené tekutiny přenášeno kondukcí skrze stěny kanálu. (Lipták, 2003)



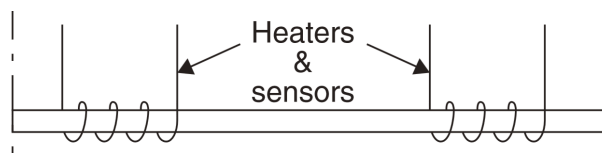
Obr. 3.3: Kalorimetrický průtokoměr s vně umístěnými snímači a topným tělískem (Lipták, 2003)

Pro zkrácení doby odezvy lze použít senzor zobrazený na obrázku 3.4. Snímaná teplota je použita k úpravě příkonu třech topných tělísek tak, aby byla udržena konstantní teplota. Energie nutná k udržení rovnováhy nese informaci o průtoku. (Baker, 2016)



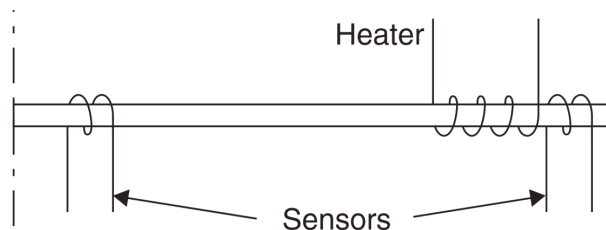
Obr. 3.4: Snímač se třemi topnými tělísy (Baker, 2016)

Obrázek 3.5 znázorňuje konstrukci, kdy jsou dvě topná tělíska a zároveň snímače teploty umístěny podél osy měrného kanálu. Při nenulovém průtoku je snímač dále po směru proudění ochlazován méně než snímač blíže po směru proudění. Výstup těchto snímačů lze opět zpracovávat diferenciálně. (Baker, 2016)



Obr. 3.5: Snímač s dvěma topnými tělísy (Baker, 2016)

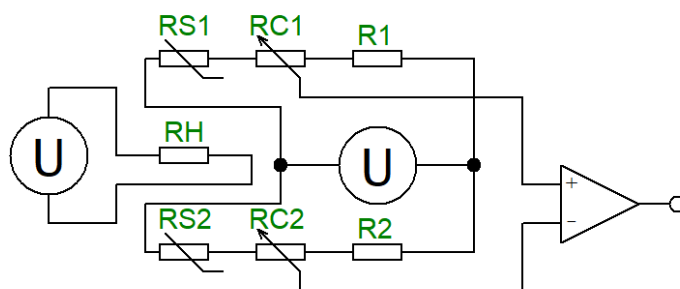
Na obrázku 3.6 je zobrazena konstrukce, připomínající klasický design, tvořená jedním topným tělískem a dvěma snímači teploty, přičemž topné tělísko je blíže ke snímači, který je umístěn dále po směru proudění. (Baker, 2016)



Obr. 3.6: Snímač s topným tělískem umístěným po proudu (Baker, 2016)

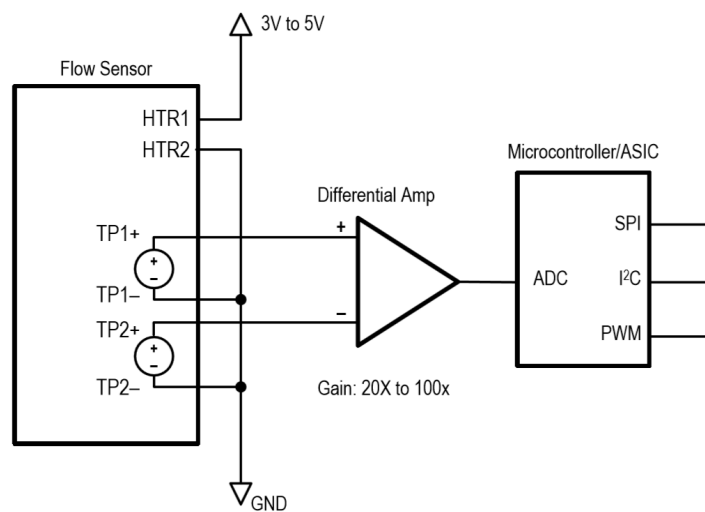
3.2 Měřicí obvody

Měřicí obvod vyhřívá topné tělísko mezi dvěma snímači teploty a vyhodnocuje rozdíl naměřených hodnot pomocí dvou snímačů teploty, například pomocí Wheatstoneova můstku a operačního zesilovače. Obvod vyhřívání je tvořen vhodným zdrojem, který napájí topné tělísko. Na obrázku 3.7 je ideové schéma zapojení kalorimetrického tepelného průtokoměru. RH je topné tělísko ohřívající měřené médium. Rezistory RS1 a RS2 jsou snímače teploty. Proměnné rezistory RC1 a RC2 umožňují kalibraci.



Obr. 3.7: Ideové zapojení kalorimetrického průtokoměru

Firma IDT v dokumentaci pro snímač IDT FS1012 uvádí schéma zapojení 3.8 kalorimetrického snímače bez můstku s aktivními snímači teploty, termočlánkovými bateriemi.



Obr. 3.8: Diferenciální zapojení snímače FS1012 (FS1012 Datasheet, 2017)

4 KALIBRACE TEPELNÝCH SNÍMAČŮ PRŮTOKU

Kalibrace snímačů průtoku se ve většině případů provádí pro normální podmínky dle NIST (National Institute of Standards and Technology) - tabulka 4.1. (Lipták, 2003)

Tab. 4.1: Normální podmínky dle NIST

Tlak p	101 325 Pa
Teplota T	20°C = 293,15 K

Hmotnostní kalibraci kapalin lze provést pomocí přímého odměřování hmotnosti. Z nádrže naplněné kalibračním médiem je přečerpávána tekutina přes kalibrovaný snímač do druhé nádrže. Z hmotnosti přečerpané tekutiny a doby přečerpávání lze podle vztahu 1.4 určit hmotnostní průtok. (Orlíková, 2001)

Podobným způsobem lze provést i kalibraci objemového průtoku. Z objemu protékajícího snímačem a doby protékání lze dle vztahu 1.3 určit objemový průtok. (Orlíková, 2001)

Pro kalibraci malých průtoků plynu do 20 slpm (standard litres per minute) se nejčastěji využívá speciální vertikálně umístěná pístnice tvořená precizním skleněným válcem v němž se pohybuje píst. Píst má po obvodu drážku vyplněnou rtutí, která působí jako těsnění bez tření. Píst je připojen k enkodéru pro snímání polohy. Pohybem pístu dochází k vyvolání proudění. Ze známosti rychlosti pohybu pístu lze určit vytvořený průtok. Při kalibraci se kompenzuje vliv teploty a tlaku hmotnosti pístu a tření. (Lipták, 2003; Baker, 2016)

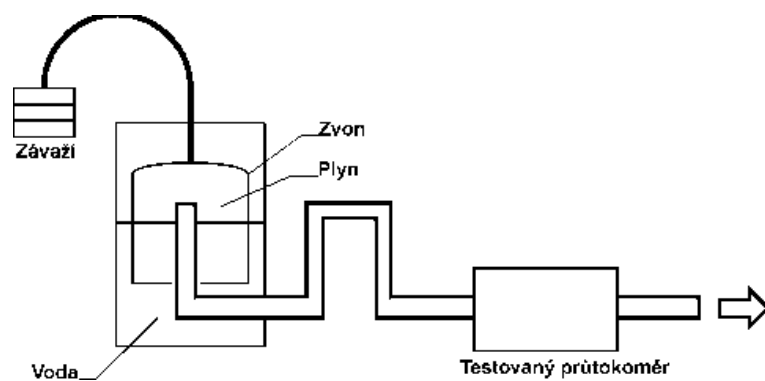
Kalibrace větších průtoků až do 5000 slpm se provádí metodou zvonu. Tato metoda je zobrazena na obrázku 4.1. V nádrži naplněné vodou nebo olejem je umístěn zvon, který je přitahován dolů, či zdvihán nahoru, a je snímána jeho poloha pomocí enkodéru. Opět ze známosti rychlosti pohybu zvonu lze určit generovaný průtok kompenzovaný na tlak. (Lipták, 2003)

Pro méně náročné aplikace lze použít kalibraci pomocí přesnějšího referenčního průtokoměru ve větrném tunelu nebo měřicí trati. (Lipták, 2003)

Pro přepočet objemového průtoku z aktuálních podmínek na normální lze použít vztah 4.1. (Baker, 2016)

$$Q_{Vs} = Q_V a \frac{T_s p_a}{T_a p_s} \quad (4.1)$$

Q_{Vs} objemový průtok při normálních podmínkách



Obr. 4.1: Metoda zvonu (Orlíková, 2001)

Q_{V_a}	objemový průtok při aktuálních podmínkách
T_s	teplota při normálních podmínkách
T_a	teplota při aktuálních podmínkách
p_s	tlak při normálních podmínkách
p_a	tlak při aktuálních podmínkách

5 PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V této části práce budou využívány tyto symboly:

R_S	odpor snímače teploty
R_H	odpor topného tělíska
T_S	teplota snímače teploty
T_H	teplota topného tělíska
T_0	teplota proudící tekutiny
ΔT_S	rozdíl teplot $T_H - T_S$
ΔT_0	rozdíl teplot $T_H - T_0$
v	rychlost proudění
P	příkon topného tělíska
I	proud topným tělískem
α	měrný odpor, pro platinu platí $\alpha = 0,00385 \text{ K}^{-1}$

5.1 Vlastnosti snímače IST FS7

V rámci své bakalářské práce jsem provedl sérii měření za účelem zjištění vlastností snímače IST FS7, na základě kterých jsem provedl návrh zpracující elektroniky a SW.

5.1.1 Měření přestupu tepla ze snímače IST FS7 do okolního vzduchu

Postup

1. část měření jsem provedl s pomocí horkovzdušné pistole. V přípravku byl instalován snímač IST FS7. Topný odpor tohoto snímače byl napájen danými napětími a odečítán proud, který jím procházel. Ze známosti napětí a proudu byl určen odpor ohmovou metodou. V přípravku byl také instalován referenční snímač Voltcraft PL-135HAN, ze kterého byl odečítán průtok média. Na horkovzdušné pistoli byly nastavovány různé hodnoty průtoku při teplotě 50°C.

2. část měření jsem provedl s pomocí laboratorního přípravku do úlohy BMFV. Nastavoval jsem průtok, jako referenční měřidlo opět sloužil snímač Voltcraft PL-135HAN, při různých hodnotách průtoku a napětí byl odečítán proud topným tělískem a z něj vypočten odpor.

Pro výpočet teploty tělíska jsem použil vztah:

$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} \quad (5.1)$$

Kdy α platiny $0,00385 \text{ K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla lze vypočítat ze vztahu:

$$\lambda = \frac{P}{\Delta T} \quad (5.2)$$

Výsledky měření

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$

$v \text{ [ms}^{-1}\text{]}$ $T_0 = 50^\circ\text{C}$		9,98	12,8	13,5	15,5
$U = 2\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	33,8	33,9	33,8	33,8
	$R_H \text{ }[\Omega]$	59,17	58,83	58,89	59
	$P \text{ [W]}$	0,0676	0,0675	0,0674	0,0673
	$T_H \text{ }[^\circ\text{C}]$	81,8	79,8	80,2	80,8
$U = 2,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	40,1	40,4	40,5	40,6
	$R_H \text{ }[\Omega]$	62,3	61,88	61,73	61,58
	$P \text{ [W]}$	0,1	0,101	0,101	0,102
	$T_H \text{ }[^\circ\text{C}]$	99,84	97,44	96,56	95,68
$U = 3\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	45,8	46,2	46,3	46,4
	$R_H \text{ }[\Omega]$	65,57	64,91	64,74	64,68
	$P \text{ [W]}$	0,137	0,139	0,139	0,139
	$T_H \text{ }[^\circ\text{C}]$	118,75	114,9	113,93	113,61
$U = 3,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	50,6	51,2	51,4	51,6
	$R_H \text{ }[\Omega]$	69,13	68,39	68,11	67,82
	$P \text{ [W]}$	0,177	0,179	0,180	0,181
	$T_H \text{ }[^\circ\text{C}]$	139,27	134,98	133,37	131,7
$U = 4\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	54,9	55,6	55,9	56,1
	$R_H \text{ }[\Omega]$	72,93	71,94	71,61	71,34
	$P \text{ [W]}$	0,219	0,222	0,223	0,224
	$T_H \text{ }[^\circ\text{C}]$	161,19	155,51	153,58	152,03

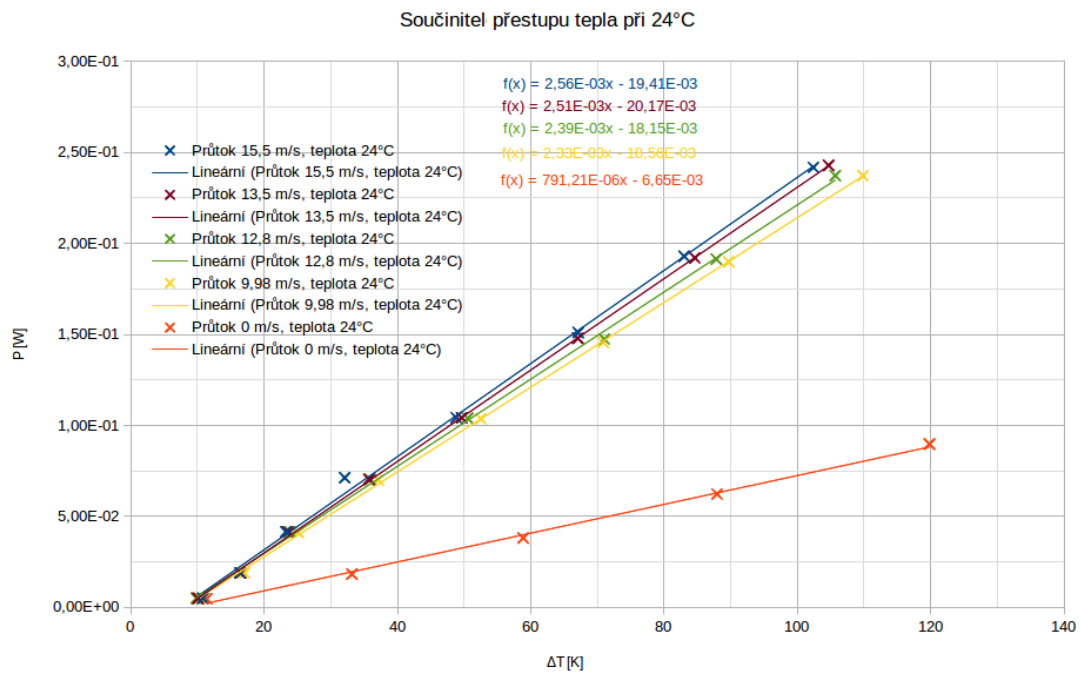
Z naměřených hodnot je patrné, že napětí $1,5\text{V}$ je dostatečné k ohřátí topného tělíska o teplotu $\Delta T_0 \approx 60^\circ\text{C}$ při nulovém průtoku a $\Delta T_0 \approx 20^\circ\text{C}$ při rychlosti proudění $v = 15,5 \text{ ms}^{-1}$. Součinitel přestupu tepla λ pro různé průtoky při teplotě okolního média $T = 24^\circ\text{C}$ je zobrazena na obrázku 5.1. Tento součinitel se skládá

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty při teplotě média $T_0 = 24^\circ\text{C}$

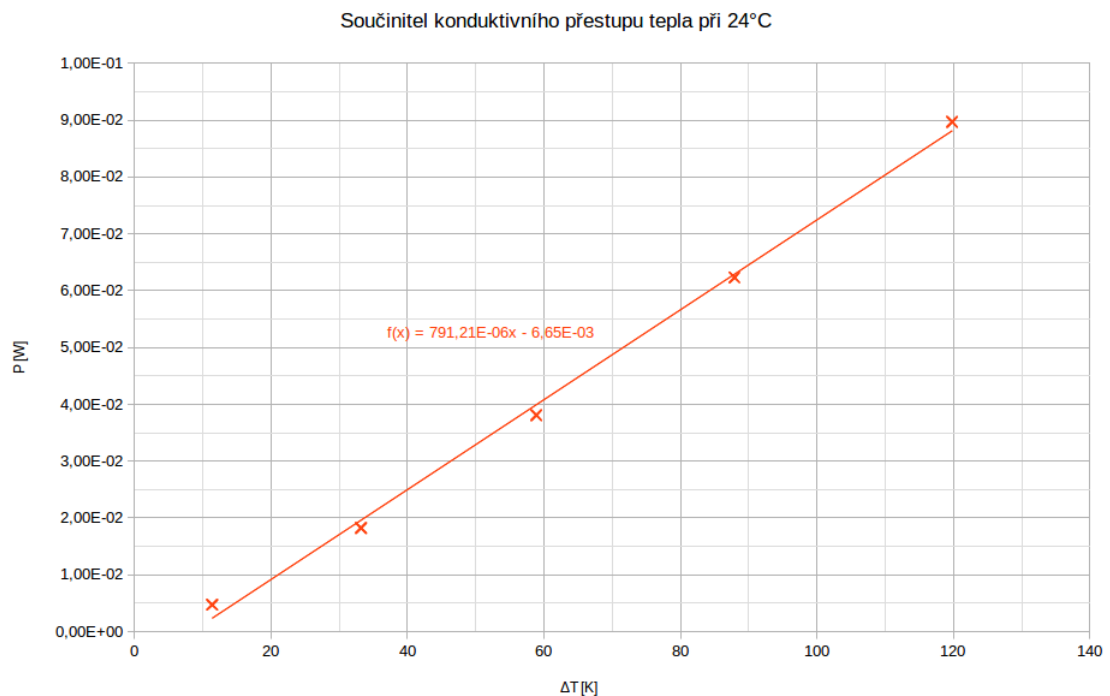
$v \text{ [ms}^{-1}\text{]}$ $T_0 = 24^\circ\text{C}$		0	9,98	12,8	13,5	15,5
$U = 0,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	9,59	9,91	9,93	9,92	9,90
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$	51,09	50,92	50,83	50,87	51
	$P \text{ [mW]}$	4,70	5,00	5,01	5,01	4,99
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$	35,18	34,19	33,66	33,89	34,61
$U = 1\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	18,22	19,04	19,07	19,07	19,07
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$	54,87	52,08	51,98	51,98	51,96
	$P \text{ [mW]}$	18,22	18,88	18,91	18,90	18,89
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$	56,99	40,86	40,27	40,27	40,18
$U = 1,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	25,34	27,81	27,90	27,92	27,94
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$	59,33	53,47	53,26	53,21	53,16
	$P \text{ [mW]}$	38,08	41,34	41,45	41,47	41,50
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$	82,69	48,87	47,68	47,4	47,08
$U = 2\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	31,12	35,52	35,63	35,65	36,07
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$	64,36	55,55	55,35	55,31	54,69
	$P \text{ [mW]}$	62,31	70,09	70,26	70,29	71,15
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$	111,75	60,91	59,76	59,51	55,9
$U = 2,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$	35,83	42,19	42,37	42,47	42,56
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$	69,88	58,22	57,88	57,72	57,58
	$P \text{ [mW]}$	89,71	103,63	103,90	104,12	104,30
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$	143,63	76,31	74,33	73,44	72,62
$U = 3\text{V}$	$I \text{ [mA]}$		48,71	48,96	49,33	49,86
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$		61,4	61,44	60,74	60,75
	$P \text{ [mW]}$		145,69	147,27	147,82	151,03
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$		94,69	94,88	90,87	90,91
$U = 3,5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$		54,17	54,52	54,86	55,11
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$		64,67	64,34	63,79	63,51
	$P \text{ [mW]}$		189,76	191,26	191,98	192,89
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$		113,52	111,65	108,45	106,84
$U = 4\text{V}$	$I \text{ [mA]}$		58,98	59,30	60,08	60,12
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$		68,16	67,44	67,26	66,87
	$P \text{ [mW]}$		237,10	237,14	242,78	241,68
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$		133,67	129,51	128,49	126,21
$U = 5\text{V}$	$I \text{ [mA]}$			63,70	64,02	64,31
	$R \text{ [}\Omega\text{]}$			70,82	70,42	70,07
	$P \text{ [mW]}$			287,35	288,60	289,78
	$T_H \text{ [}^\circ\text{C]}$			149,01	146,7	144,69

ze dvou částí. Součinitele přestupu tepla způsobeného prouděním λ_{konv} a součinitele přestupu tepla způsobeného vedením λ_{kond} , jenž je zobrazen na obrázku 5.2. Pro úplnost součinitel přestupu tepla λ při teplotě média 50°C je zobrazen na obrázku 5.3.

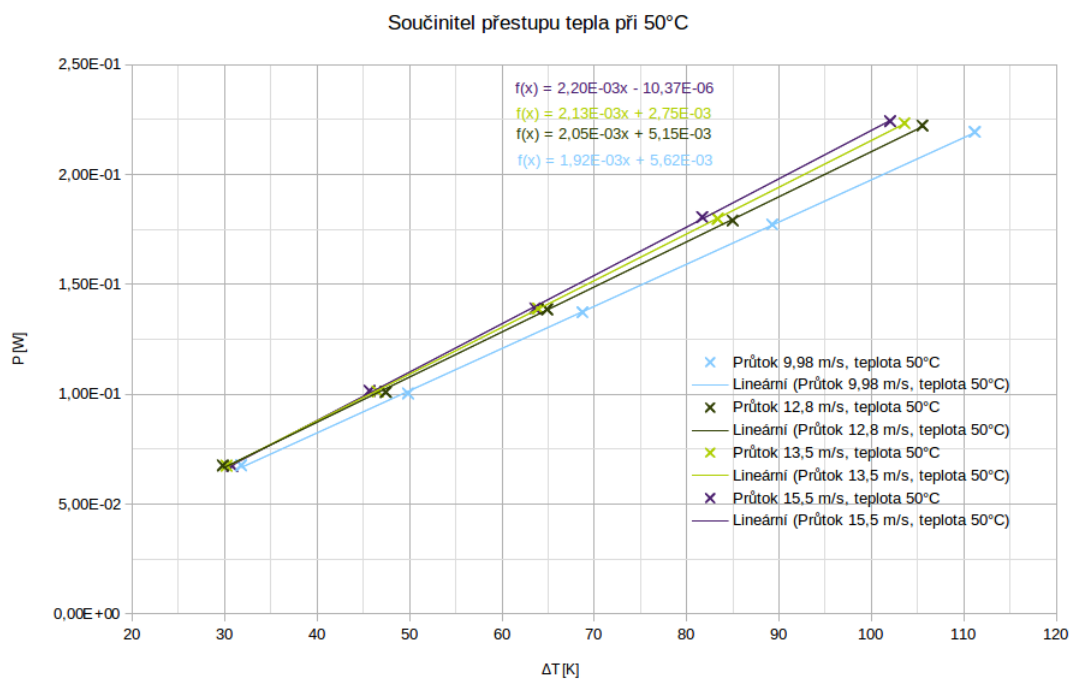
Na obrázku 5.4 je zobrazena závislost součinitele přestupu tepla λ na průtoku při různých rozdílech teploty okolí a topného tělíska ΔT_0 pro teplotu okolí $T_0 = 24^\circ\text{C}$ a $T_0 = 50^\circ\text{C}$. Závislost λ na absolutní teplotě okolí není prokázána, protože závislosti pro různé T_0 jsou rovnoběžné.



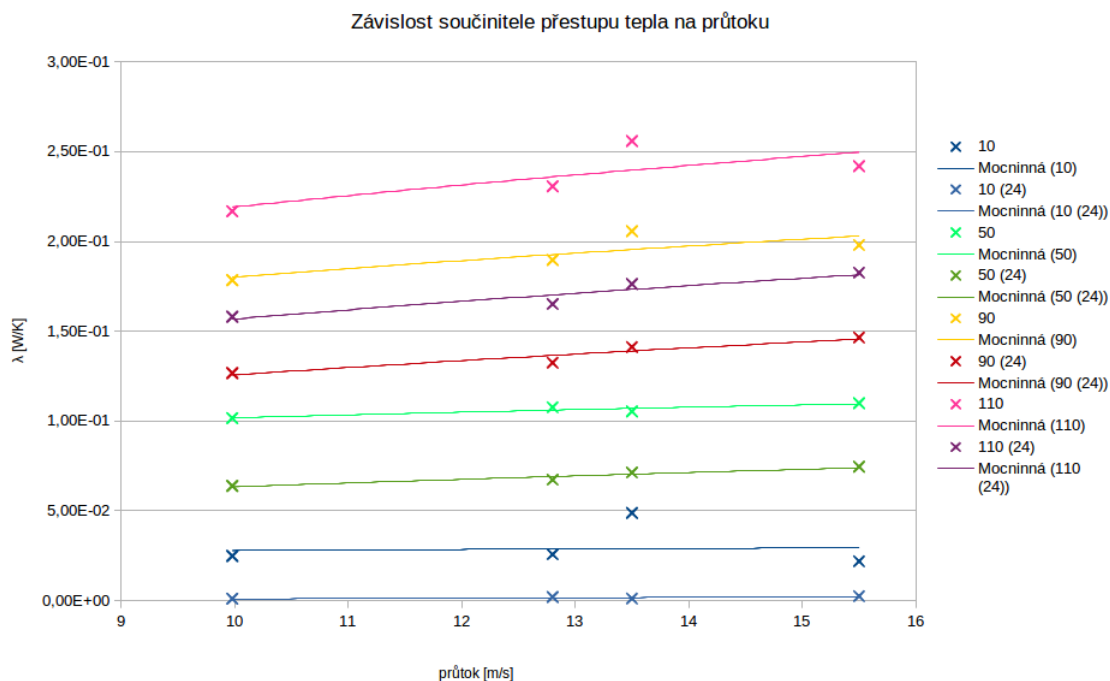
Obr. 5.1: Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 24^\circ\text{C}$



Obr. 5.2: Součinitel přestupu tepla způsobený vedením při $T_0 = 24^\circ\text{C}$



Obr. 5.3: Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$



Obr. 5.4: Porovnání závislostí součinitele přestupu tepla λ na průtoku v

5.1.2 Získávání koeficientů matematického modelu snímače

Postup

1. měření pro získání koeficientů matematického modelu snímače 5.4 jsem provedl s využitím laboratorního přípravku do úlohy BMFV a originální zpracující elektroniky, která sloužila jako regulátor na konstantní rozdíl teploty topného tělíska a teploty snímače ΔT_S . Pro různé nastavené hodnoty ΔT_S byl odečítán příkon topného tělíska P v závislosti na rychlosti proudění v . Referenční měření rychlosti proudění v bylo provedeno pomocí anemometru Voltcraft PL-135HAN, který byl umístěn za snímačem IST FS7.

2. měření jsem provedl s mírně modifikovaným laboratorním přípravkem, kdy byla zkrácena vzdálenost mezi topením a snímačem IST FS7. Pomocí topení jsem nastavil teplotu média. Teplota topného tělíska snímače byla opět regulována originální zpracující elektronikou a opět jsem pro různá ΔT_0 zaznamenával závislost příkonu P na průtoku v . Referenční průtokoměr Voltcraft PL-135HAN byl umístěn na začátku kanálu viz obrázek 5.5. Z naměřené závislosti příkonu topného tělíska P poděleného ΔT_S na $v^{0,5}$ lze určit koeficienty již dříve zmíněného vztahu 5.4. Bias vzniklé přímkou je koeficient A a směrnice závislosti je koeficient B.

Pro měření teploty jsem použil termočlánek s multimetrem UNI-T UT804.

$$P_H = R_H I_H^2 = (A + Bv^{0,5})\Delta T \quad (5.3)$$

Výsledky měření

Závislost příkonu P topného tělíska na průtoku v stanovená z hodnot z tabulky 5.3 je zobrazena na obrázku 5.7.

Tab. 5.3: Naměřená závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 při teplotě okolí $T_0 = 26^\circ\text{C}$ (1. měření)

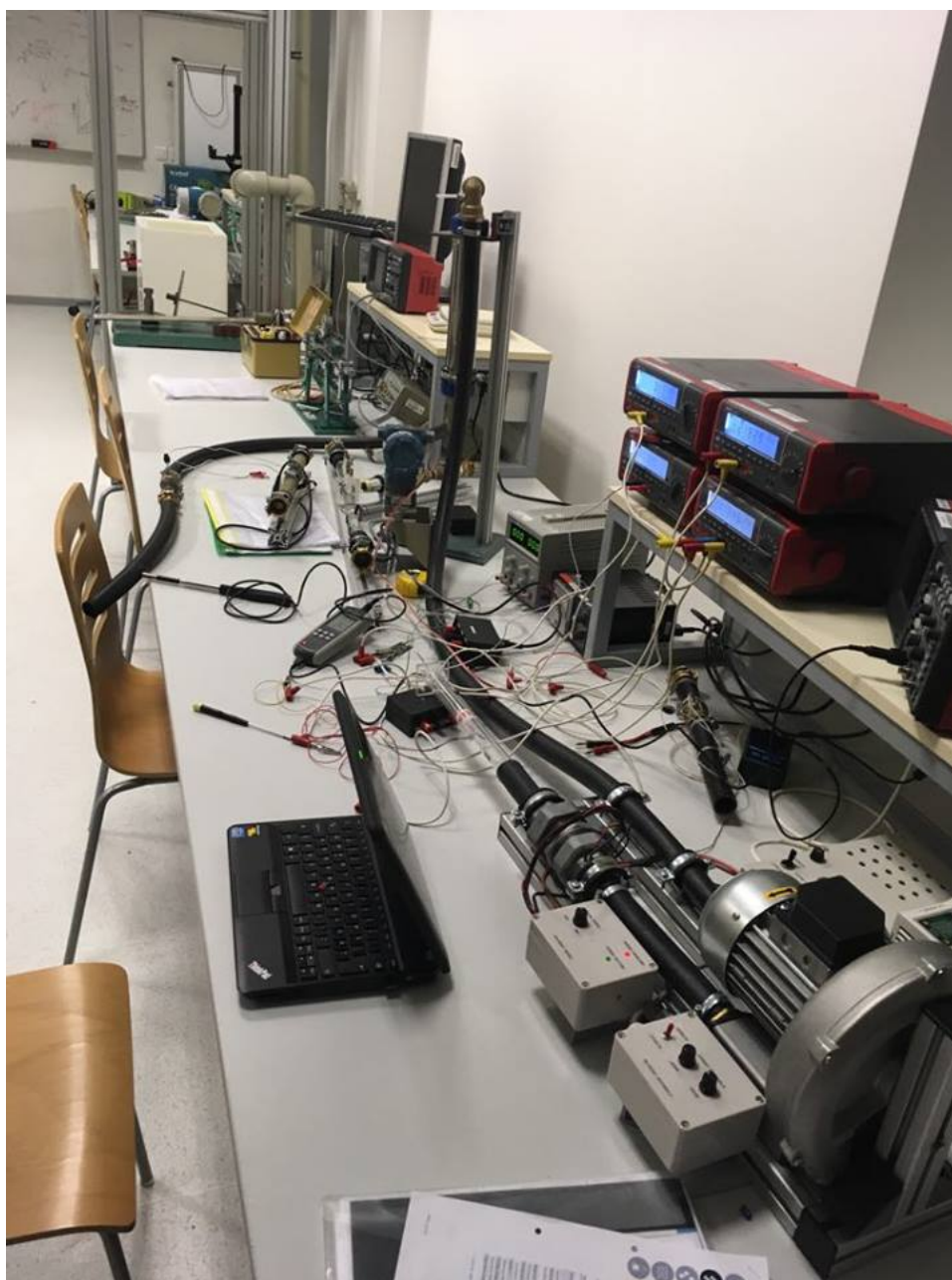
Výhříváno na $T_H = 30^\circ\text{C}$	v [ms^{-1}]	0	0,5	0,9	4,03	10,33	17,12
	U [V]	0,4145	0,424	0,4235	0,4278	0,4288	0,4295
	I [mA]	8,243	8,472	8,48	8,582	8,584	8,572
	R [Ω]	50,2851	50,0472	49,9410	49,8485	49,9534	50,1050
	P [W]	0,0034	0,0036	0,0036	0,0037	0,0037	0,0037
	T_H [$^\circ\text{C}$]	30,5056	29,1326	28,5197	27,9857	28,5911	29,4660
	$P\Delta T_0^{-1}$ [WK^{-1}]	0,000711	0,001046	0,001274	0,001606	0,001273	0,000978
Výhříváno na $T_H = 40^\circ\text{C}$	v [ms^{-1}]	0	0,48	1,73	6,65	10,26	16,32
	U [V]	0,7485	0,846	0,9394	1,0733	1,1152	1,1619
	I [mA]	14,36	16,31	18,165	20,777	21,6	22,546
	R [Ω]	52,1240	51,8700	51,7148	51,6581	51,6296	51,5346
	P [W]	0,0107	0,0138	0,0171	0,0223	0,0241	0,0262
	T_H [$^\circ\text{C}$]	41,1195	39,6538	38,7581	38,4305	38,2663	37,7180
	$P\Delta T_0^{-1}$ [WK^{-1}]	0,000697	0,000989	0,001307	0,001752	0,001917	0,002180
Výhříváno na $T_H = 50^\circ\text{C}$	v [ms^{-1}]	0	0,48	1,14	6,63	9,87	15,64
	U [V]	0,8485	0,845	1,0663	1,2847	1,348	1,2588
	I [mA]	15,99	15,609	20,164	24,491	25,689	23,821
	R [Ω]	53,0644	54,1354	52,8814	52,4560	52,4738	52,8441
	P [W]	0,0136	0,0132	0,0215	0,0315	0,0346	0,0300
	T_H [$^\circ\text{C}$]	46,5479	52,7298	45,4913	43,0361	43,1389	45,2764
	$P\Delta T_0^{-1}$ [WK^{-1}]	0,000651	0,000488	0,001086	0,001815	0,001986	0,001532

Tab. 5.4: Naměřená závislost příkonu P na průtoku pro $\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$ při různé teplotě okolí T_0 (2. měření)

	$T_0 = 40^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$		
v [ms^{-1}]	2,210	4,160	6,660	10,300	13,280
U [V]	0,928	0,999	1,074	1,144	1,185
I [mA]	17,068	18,403	19,789	21,085	21,829
R [Ω]	54,394	54,257	54,262	54,261	54,267
P [W]	0,016	0,018	0,021	0,024	0,026
T_H [$^\circ\text{C}$]	54,223	53,434	53,463	53,456	53,491
$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00111	0,00137	0,00158	0,00179	0,00192
	$T_0 = 55^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$		
průtok [ms^{-1}]	2,090	4,240	6,180	10,280	13,650
U [V]	0,867	0,920	1,027	1,143	1,183
I [mA]	15,371	16,148	18,054	20,077	20,753
R [Ω]	56,398	56,998	56,902	56,931	57,009
P [W]	0,013	0,015	0,019	0,023	0,025
T_H [$^\circ\text{C}$]	65,792	69,251	68,696	68,865	69,314
$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00123	0,00104	0,00135	0,00166	0,00172
	$T_0 = 85^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$		
průtok [ms^{-1}]	2,220	4,210	6,460	10,780	13,250
U [V]	0,734	0,836	0,935	1,132	1,172
I [mA]	11,980	13,683	15,323	18,407	19,063
R [Ω]	61,269	61,083	60,993	61,477	61,496
P [W]	0,009	0,011	0,014	0,021	0,022
T_H [$^\circ\text{C}$]	93,903	92,832	92,313	95,103	95,216
$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00099	0,00146	0,00196	0,00206	0,00219

Tab. 5.5: Naměřená závislost příkonu P na průtoku pro $\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$ při různé teplotě okolí T_0 (2. měření)

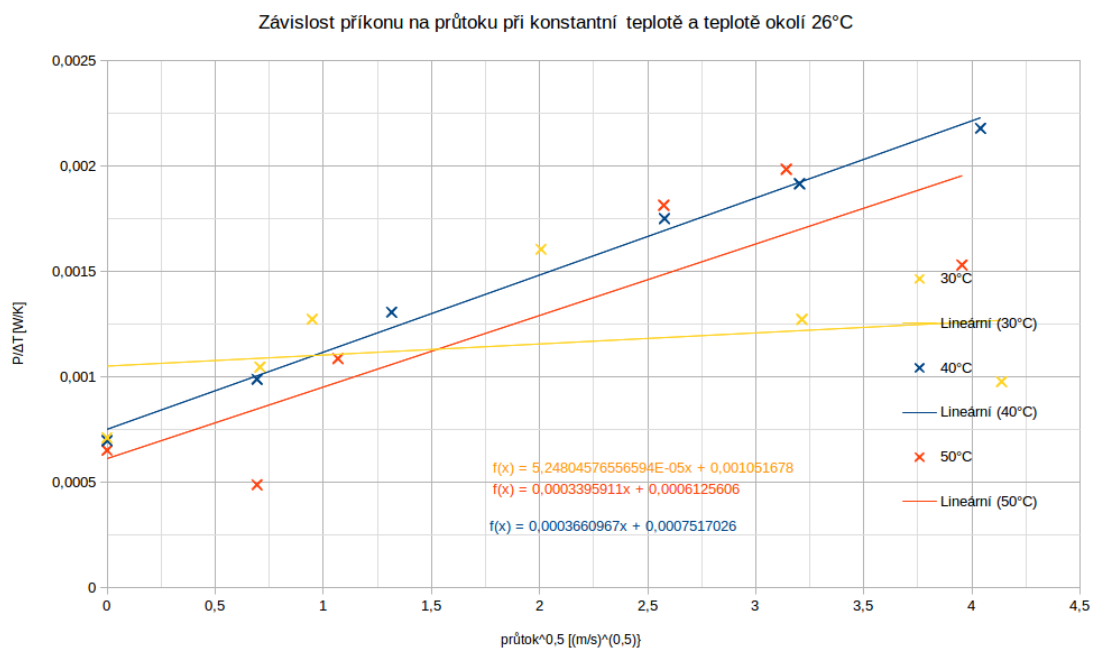
$T_0 = 40^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$			
$v [\text{ms}^{-1}]$	2,250	4,190	6,750	10,350	13,400
$U [\text{V}]$	1,139	1,212	1,298	1,375	1,421
$I [\text{mA}]$	20,616	22,045	23,616	25,126	25,963
$R [\Omega]$	55,258	54,983	54,942	54,736	54,736
$P [\text{W}]$	0,023	0,027	0,031	0,035	0,037
$T_H [^\circ\text{C}]$	59,210	57,622	57,383	56,197	56,194
$P\Delta T^{-1} [\text{WK}^{-1}]$	0,00122	0,00152	0,00176	0,00213	0,00228
$T_0 = 55^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$			
$v [\text{ms}^{-1}]$	2,000	4,300	6,700	10,680	13,870
$U [\text{V}]$	1,028	1,123	1,275	1,407	1,445
$I [\text{mA}]$	17,916	19,362	22,106	24,381	25,122
$R [\Omega]$	57,357	57,980	57,677	57,701	57,527
$P [\text{W}]$	0,018	0,022	0,028	0,034	0,036
$T_H [^\circ\text{C}]$	71,322	74,918	73,170	73,308	72,307
$P\Delta T^{-1} [\text{WK}^{-1}]$	0,00113	0,00109	0,00155	0,00187	0,00210
$T_0 = 85^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$			
$v [\text{ms}^{-1}]$	2,240	4,090	5,930	10,800	13,53
$U [\text{V}]$	0,828	0,986	1,190	1,430	1,479
$I [\text{mA}]$	12,839	15,359	18,465	22,809	23,615
$R [\Omega]$	64,514	64,164	64,452	62,703	62,638
$P [\text{W}]$	0,011	0,015	0,022	0,033	0,035
$T_H [^\circ\text{C}]$	112,637	110,617	112,275	102,184	101,808
$P\Delta T^{-1} [\text{WK}^{-1}]$	0,00038	0,00059	0,00081	0,00190	0,00208
$T_0 = 35^\circ\text{C}$		$\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$			
$v [\text{ms}^{-1}]$	2,030	4,250	6,450	10,220	13,130
$U [\text{V}]$	0,964	1,026	1,082	1,133	1,173
$I [\text{mA}]$	18,146	19,414	20,419	21,408	22,204
$R [\Omega]$	53,119	52,869	52,980	52,929	52,815
$P [\text{W}]$	0,017	0,020	0,022	0,024	0,026
$T_H [^\circ\text{C}]$	46,864	45,420	46,061	45,765	45,107
$P\Delta T^{-1} [\text{WK}^{-1}]$	0,00147	0,00191	0,00200	0,00225	0,00258



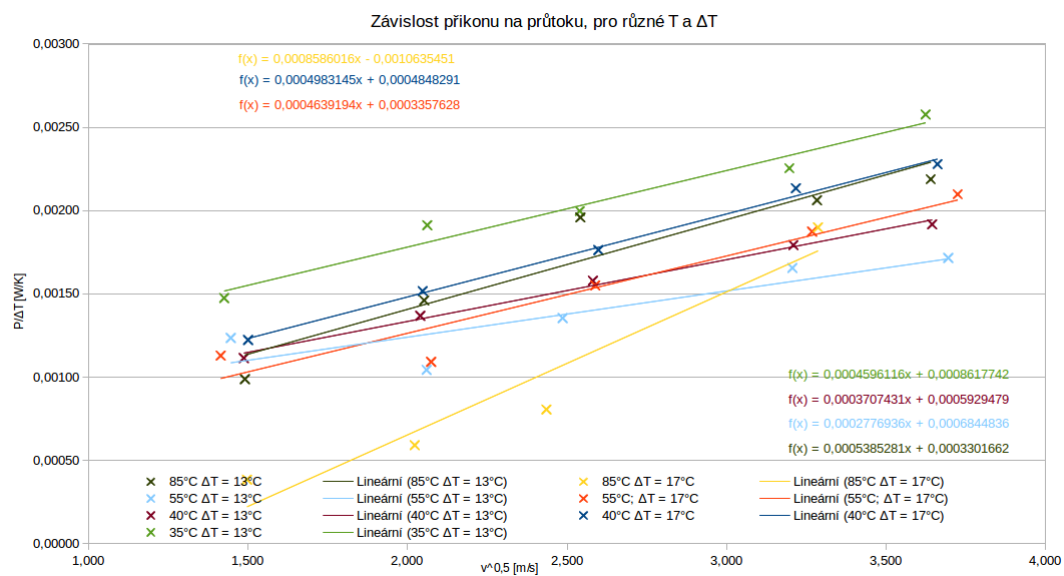
Obr. 5.5: Sestava při druhém měření pro získání koeficientů matematického modelu snímače



Obr. 5.6: Umístění snímače IST FS7 a snímače teploty média



Obr. 5.7: Závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 (T_H) při teplotě okolí $T_0 = 26^\circ\text{C}$



Obr. 5.8: Závislost příkonu P na průtoku v pro různé ΔT_0 při různých teplotě okolí T_0

5.1.3 Měření přestupu tepla při nulovém průtoku

Postup

Měření jsem provedl s pomocí kalibračního termostatu, kde byl umístěn snímač FS7. Otvor termostatu byl utěsněn, aby se zamezilo proudění vzduchu. Nastavoval jsem napětí na topném tělísku U a zaznamenával proud topným tělískem I . Z proudu I a napětí U byl určen aktuální odpor topného tělíska snímače IST FS7 R_H a z odporu pomocí výše zmíněného vztahu 5.1 teplota topného tělíska T_H .

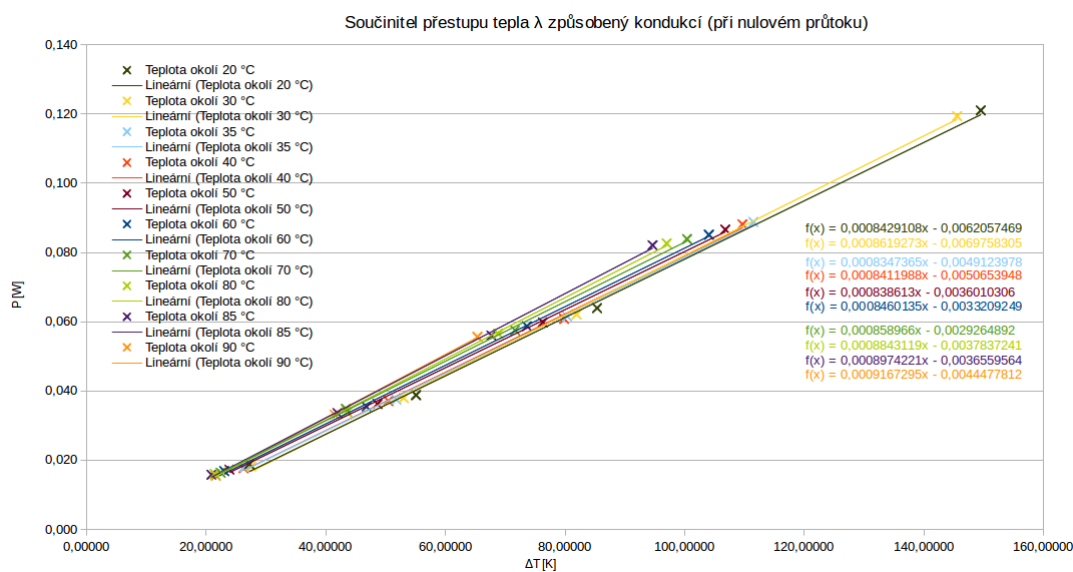
Výsledky měření

Doplněním výsledků do grafu 5.3 vznikne graf 5.10.

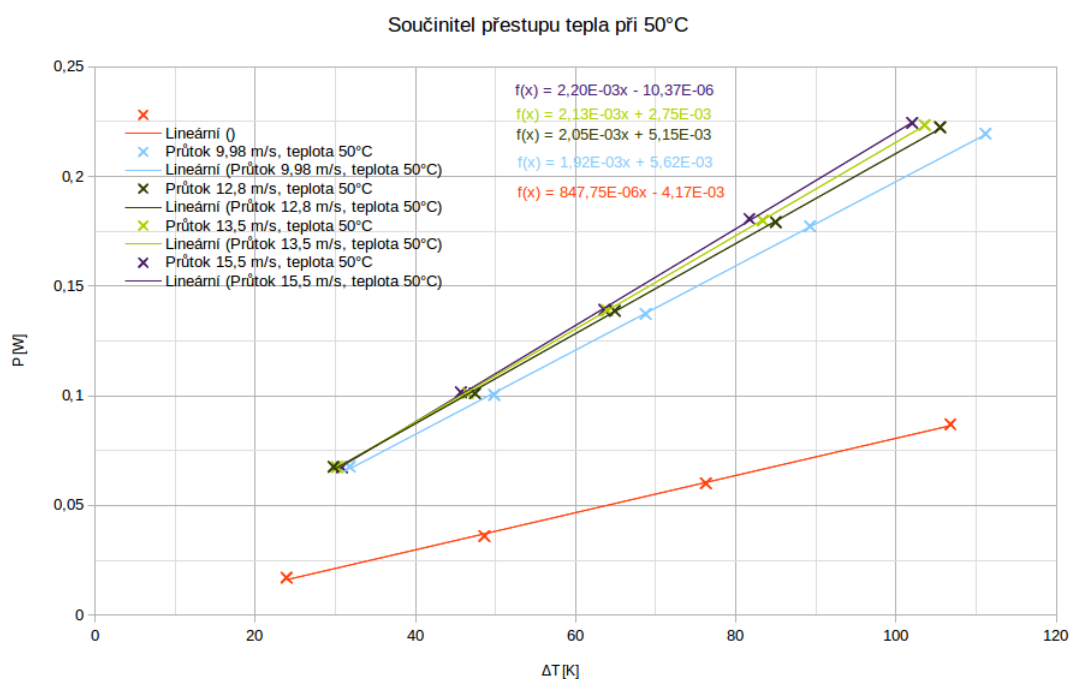
Tab. 5.6: Naměřené hodnoty oteplení ΔT_0 při různém příkonu P pro různé teploty okolí T_0

$T_0 = 20^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	18,804	25,859	31,788	40,340
	R_H [Ω]	53,180	58,007	63,257	74,368
	P [W]	0,019	0,039	0,064	0,121
	T_H [$^\circ\text{C}$]	47,216	75,076	105,377	169,512
	$P\Delta T^{-1}$ [W K^{-1}]	0,00154	0,00097	0,00091	0,00090
	ΔT [K]	27,21601	55,07581	85,37706	149,51153
$T_0 = 30^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	18,190	25,288	31,060	39,780
	R_H [Ω]	54,975	59,380	64,392	75,415
	P [W]	0,018	0,038	0,062	0,119
	T_H [$^\circ\text{C}$]	57,577	83,001	111,928	175,554
	$P\Delta T^{-1}$ [W K^{-1}]	0,00081	0,00079	0,00081	0,00085
	ΔT [K]	27,57726	53,00111	81,92785	145,55429
$T_0 = 35^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	17,971	24,985	30,777	35,520
	R_H [Ω]	55,645	60,036	64,984	70,383
	P [W]	0,018	0,037	0,062	0,089
	T_H [$^\circ\text{C}$]	61,444	86,788	115,345	146,510
	$P\Delta T^{-1}$ [W K^{-1}]	0,00068	0,00072	0,00077	0,00080
	ΔT [K]	26,44419	51,78800	80,34541	111,51015
$T_0 = 40^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	17,705	24,723	30,411	35,245
	R_H [Ω]	56,481	60,672	65,766	70,932
	P [W]	0,018	0,037	0,061	0,088
	T_H [$^\circ\text{C}$]	66,270	90,460	119,860	149,680
	$P\Delta T^{-1}$ [W K^{-1}]	0,00057	0,00067	0,00072	0,00077
	ΔT [K]	26,26967	50,46031	79,85961	109,67993

$T_0 = 50^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	17,300	24,160	29,906	34,641
	R_H [Ω]	57,803	62,086	66,876	72,169
	P [W]	0,017	0,036	0,060	0,087
	T_H [$^\circ\text{C}$]	73,902	98,621	126,270	156,819
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00044	0,00057	0,00066	0,00071
	ΔT [K]	23,90169	48,62103	76,26962	106,81857
$T_0 = 60^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	16,840	23,622	29,346	34,050
	R_H [Ω]	59,382	63,500	68,152	73,421
	P [W]	0,017	0,035	0,059	0,085
	T_H [$^\circ\text{C}$]	83,015	106,783	133,636	164,049
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00035	0,00049	0,00060	0,00066
	ΔT [K]	23,01543	46,78284	73,63572	104,04871
$T_0 = 70^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	16,390	23,205	28,760	33,548
	R_H [Ω]	61,013	64,641	69,541	74,520
	P [W]	0,016	0,035	0,058	0,084
	T_H [$^\circ\text{C}$]	92,426	113,369	141,651	170,390
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00029	0,00044	0,00054	0,00062
	ΔT [K]	22,42605	43,36936	71,65096	100,39013
$T_0 = 80^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	15,981	22,589	28,255	33,040
	R [Ω]	62,574	66,404	70,784	75,666
	P [W]	0,016	0,034	0,057	0,083
	T_H [$^\circ\text{C}$]	101,439	123,544	148,825	177,004
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00024	0,00038	0,00050	0,00058
	ΔT [K]	21,43900	43,54402	68,82500	97,00352
$T_0 = 85^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	3
	I [mA]	15,786	22,391	27,990	32,841
	R_H [Ω]	63,347	66,991	71,454	76,124
	P [W]	0,016	0,034	0,056	0,082
	T_H [$^\circ\text{C}$]	105,901	126,933	152,693	179,650
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00022	0,00037	0,00048	0,00057
	ΔT [K]	20,90055	41,93334	67,69316	94,64997
$T_0 = 90^\circ\text{C}$	U [V]	1	1,5	2	
	I [mA]	15,544	22,132	27,811	
	R_H [Ω]	64,334	67,775	71,914	
	P [W]	0,016	0,033	0,056	
	T_H [$^\circ\text{C}$]	111,593	131,458	155,348	
	$P\Delta T^{-1}$ [WK^{-1}]	0,00020	0,00034	0,00046	
	ΔT [K]	21,59310	41,45840	65,34771	



Obr. 5.9: Závislost příkonu P na ΔT_0 pro různé teploty okolí T_0



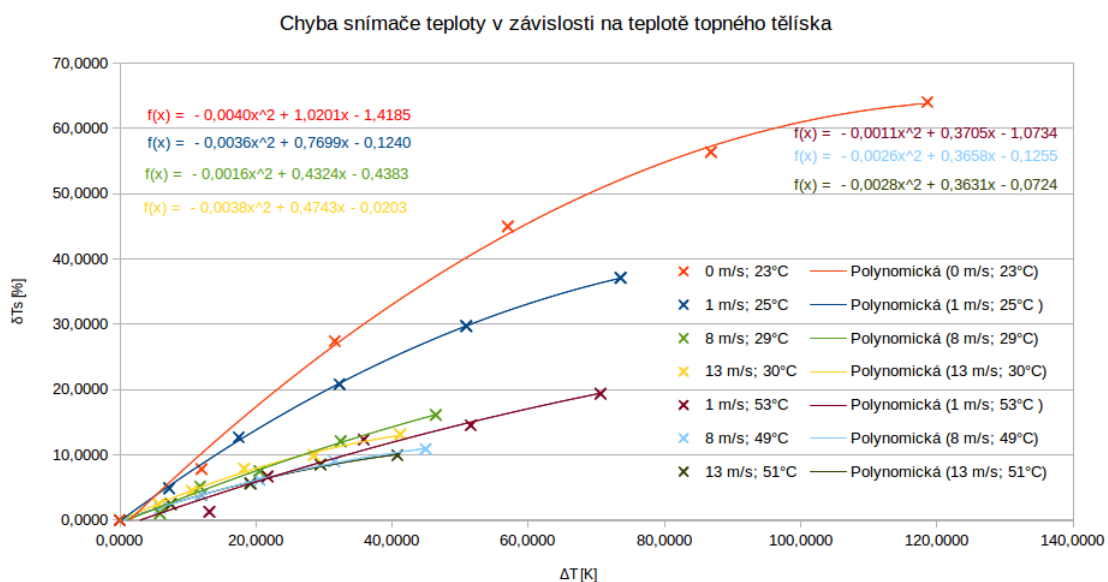
Obr. 5.10: Závislost příkonu P na rozdílu teplot topného tělíska a okolního média ΔT_0 - součinitel přestupu tepla při teplotě média $T_0 = 50^\circ\text{C}$

5.1.4 Měření vlivu teploty topného tělíska a průtoku na snímač teploty

Postup

Pro měření byl využit modifikovaný laboratorní přípravek do předmětu BMFV. Nastavován byl příkon do topného tělíska P při různém průtoku v a různé teplotě okolí T_0 . Měřen byl odpor snímače teploty R_S . Teplota z hodnoty odporu snímače teploty R_S byla určena podle vztahu 5.1. Referenčním měřidlem průtoku byl anemometr Voltcraft PL-135HAN, pro měření teploty média jsem použil termočlánek s multimetrem UNI-T UT804.

Výsledky měření



Obr. 5.11: Závislost chyby snímače teploty na ΔT_S

Tab. 5.7: Naměřené hodnoty vlivu teploty topného tělíska T_H na snímač teploty

0 ms ⁻¹ ; 23°C						
v [ms ⁻¹]	0	0	0	0	0	0
U [V]	0	0,504	1,0038	1,501	2,0015	2,5068
I [mA]	0	9,87	18,434	25,503	31,261	36,047
R_H [Ω]		51,0638	54,4537	58,8558	64,0255	69,5425
P [W]	0,0000	0,0050	0,0185	0,0383	0,0626	0,0904
T_H [°C]	23,0000	35,0005	54,5670	79,9759	109,8151	141,6597
ΔT_S [K]	0,0000	12,0005	31,5670	56,9759	86,8151	118,6597
R_S [k Ω]	1,3180	1,3280	1,3625	1,4145	1,4706	1,5281
T_S [°C]	25,5411	27,7060	35,1831	46,4293	58,5610	71,0248
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	7,8137	27,4051	44,9892	56,3854	64,0391
1 ms ⁻¹ ; 25°C						
v [ms ⁻¹]	1,07	1,08	0,9	0,91	1,03	0,93
U [V]	0	0,5042	1,006	1,506	2,0033	2,503
I [mA]	0	9,96	19,2	27,406	34,432	40,3
R_H [Ω]		50,6225	52,3958	54,9515	58,1813	62,1092
P [W]	0,0000	0,0050	0,0193	0,0413	0,0690	0,1009
T_H [°C]	25,2000	32,4530	42,6888	57,4399	76,0828	98,7543
ΔT_S [K]	0,0000	7,2530	17,4888	32,2399	50,8828	73,5543
R_S [k Ω]	1,3191	1,3252	1,3364	1,3505	1,3695	1,3894
T_S [°C]	25,7792	27,1005	29,5168	32,5650	36,6841	40,9989
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	4,8756	12,6626	20,8375	29,7264	37,1222
8 ms ⁻¹ ; 29°C						
v [ms ⁻¹]	8,55	8,55	8,48	8,64	8,6	6,44
U [V]	0	0,4968	1,0054	1,495	2,0076	2,5064
I [mA]	0	9,763	19,368	27,984	36,183	43,28
R_H [Ω]		50,8860	51,9104	53,4234	55,4846	57,9113
P [W]	0,0000	0,0049	0,0195	0,0418	0,0726	0,1085
T_H [°C]	28,1000	33,9740	39,8867	48,6198	60,5173	74,5240
ΔT_S [K]	0,0000	5,8740	11,7867	20,5198	32,4173	46,4240
R_S [k Ω]	1,3342	1,3356	1,3415	1,3451	1,3526	1,3600
T_S [°C]	29,0476	29,3466	30,6328	31,4000	33,0386	34,6252
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	1,0188	5,1747	7,4915	12,0797	16,1084

13 ms ⁻¹ ; 30°C						
v [ms ⁻¹]	12,7	12,83	13,09	13,27	13,06	13,31
U [V]	0	0,4986	0,9986	1,5017	2,001	2,5103
I [mA]	0	9,744	19,198	28,152	36,303	43,8
R_H [Ω]		51,1700	52,0158	53,3426	55,1194	57,3128
P [W]	0,0000	0,0049	0,0192	0,0423	0,0726	0,1100
T_H [°C]	29,9000	35,6130	40,4954	48,1534	58,4093	71,0695
ΔT_S [K]	0,0000	5,7130	10,5954	18,2534	28,5093	41,1695
R_S [k Ω]	1,3402	1,3437	1,3468	1,3522	1,3556	1,3614
T_S [°C]	30,3463	31,1052	31,7711	32,9495	33,6871	34,9402
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	2,4397	4,4844	7,9006	9,9172	13,1478
1 ms ⁻¹ ; 53°C						
v [ms ⁻¹]	1,23	1,17	1,14	1,17	1,26	1,17
U [V]	0	0,5155	1,0082	1,4985	2,0108	2,5
I [mA]	0	9,184	17,5	24,949	32,027	37,827
R_H [Ω]		56,1302	57,6114	60,0625	62,7845	66,0904
P [W]	0,0000	0,0047	0,0176	0,0374	0,0644	0,0946
T_H [°C]	51,1000	64,2437	72,7932	86,9410	102,6524	121,7337
ΔT_S [K]	0,0000	13,1437	21,6932	35,8410	51,5524	70,6337
R_S [k Ω]	1,4504	1,4536	1,4684	1,4857	1,4929	1,5106
T_S [°C]	54,1991	54,8915	58,0882	61,8388	63,3976	67,2246
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	1,2614	6,6951	12,3541	14,5092	19,3761
8 ms ⁻¹ ; 49°C						
v [ms ⁻¹]	8,11	8,28	8,38	8,64	8,57	8,16
U [V]	0	0,5091	1,0087	1,5118	2,0088	2,5085
I [mA]	0	9,321	18,121	26,455	34,018	40,87
R_H [Ω]		54,6186	55,6647	57,1461	59,0511	61,3775
P [W]	0,0000	0,0047	0,0183	0,0400	0,0683	0,1025
T_H [°C]	49,6000	55,5186	61,5567	70,1073	81,1030	94,5312
ΔT_S [K]	0,0000	5,9186	11,9567	20,5073	31,5030	44,9312
R_S [k Ω]	1,4315	1,4358	1,4407	1,4467	1,4544	1,4598
T_S [°C]	50,1082	51,0346	52,1093	53,4017	55,0599	56,2353
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	1,8152	3,8401	6,1674	8,9932	10,8954
13 ms ⁻¹ ; 51°C						
v [ms ⁻¹]	12,49	12,77	12,59	12,72	12,58	12,23
U [V]	0	0,5185	1,0039	1,5	2,0251	2,5034
I [mA]	0	9,411	17,969	26,26	34,377	41,13
R_H [Ω]		55,0951	55,8684	57,1211	58,9086	60,8655
P [W]	0,0000	0,0049	0,0180	0,0394	0,0696	0,1030
T_H [°C]	50,8000	58,2690	62,7327	69,9630	80,2804	91,5760
ΔT_S [K]	0,0000	7,4690	11,9327	19,1630	29,4804	40,7760
R_S [k Ω]	1,4436	1,4497	1,4534	1,4581	1,4663	1,4705
T_S [°C]	52,7273	54,0468	54,8403	55,8711	57,6430	58,5603
Chyba teploty T_S [%]	0,0000	2,4415	3,8530	5,6269	8,5279	9,9607

5.1.5 Závěr z měření

Protože přímky v grafu 5.9 jsou přibližně shodné, lze parametr A rovnice 5.4 považovat za konstantu způsobenou konduktivním šířením tepla $A = \mathbf{0,00081 \text{ WK}^{-1}}$.

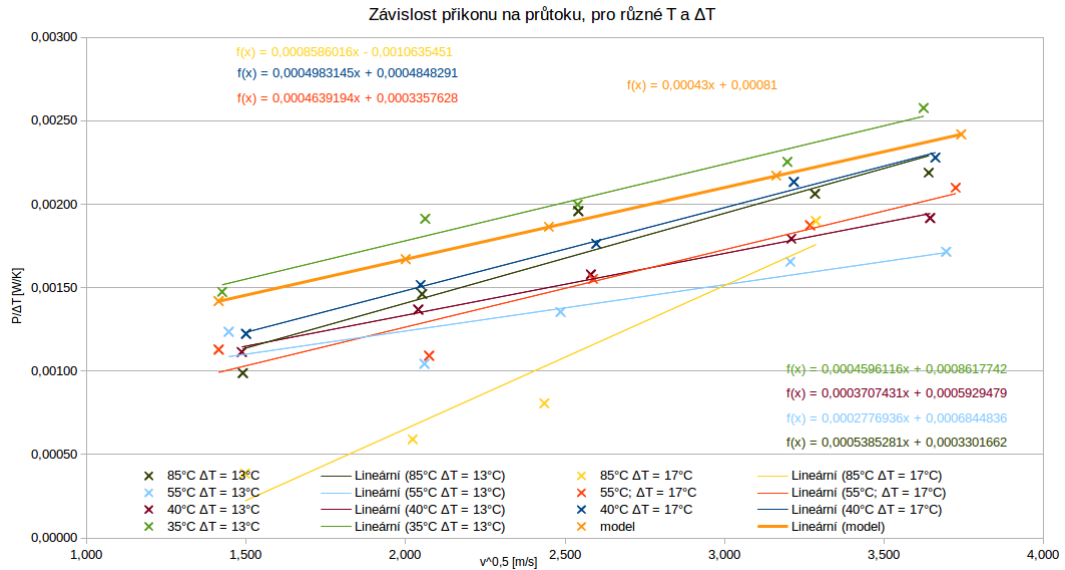
$$P_H = R_H I_H^2 = (A + Bv^{0,5})\Delta T \quad (5.4)$$

Parametr B lze určit z grafů 5.7 a 5.8. Z důvodu velké odlišnosti byla zanedbána přímka pro $T_0 = 30^\circ\text{C}$ z grafu 5.7, křivky pro $T_0 = 85^\circ\text{C}$, $\Delta T_0 = 17^\circ\text{C}$ a pro $T_0 = 55^\circ\text{C}$, $\Delta T_0 = 13^\circ\text{C}$ z grafu 5.8. Ze směrnic zbývajících přímek byl vypočítán aritmetický průměr, který odpovídá konstantě způsobené konvektivním přestupem tepla $B = \mathbf{0,00043 \text{ W s}^{0,5}\text{K}^{-1}\text{m}^{-0,5}}$.

Výsledný matematický model snímače IST FS7 vycházející z teoretických předpokladů je tedy

$$P_H = R_H I_H^2 = (0,00081 + 0,00043v^{0,5})\Delta T \quad (5.5)$$

Výsledný matematický model byl porovnán s experimentálně zjištěnými závislostmi viz tabulka 5.8. Absolutní, respektive relativní chyba je zobrazena na grafu 5.12, respektive 5.13.

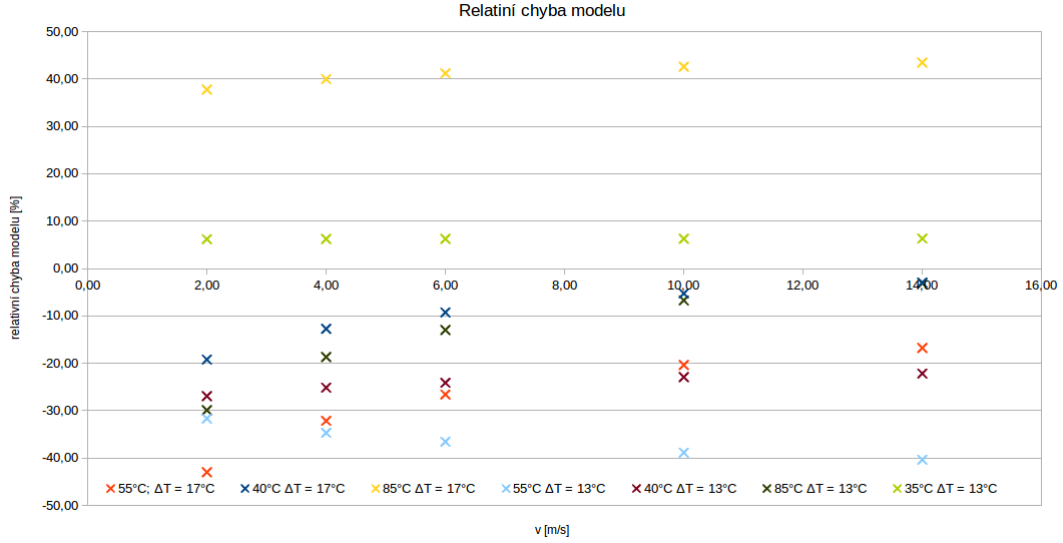


Obr. 5.12: Porovnání určeného matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů s naměřenými závislostmi

Matematický model byl navrhován s předpokladem, že parametry A a B jsou konstantní, ale dosazované hodnoty do rovnic 2.10 a 2.11 jsou závislé na teplotě.

Tab. 5.8: Absolutní a relativní chyba matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů

v [ms ⁻¹]		2,00	4,00	6,00	10,00	14,00
Matematický model	$P\Delta T^{-1}$ [WK ⁻¹]	0,00142	0,00167	0,00186	0,00217	0,00242
$T_0 = 55\text{ °C } \Delta T = 17\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00099	0,00126	0,00147	0,00180	0,00207
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	-0,00043	-0,00041	-0,00039	-0,00037	-0,00035
	Relativní chyba [%]	-42,98	-32,16	-26,57	-20,36	-16,77
$T_0 = 40\text{ °C } \Delta T = 17\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00119	0,00148	0,00171	0,00206	0,00235
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	-0,00023	-0,00019	-0,00016	-0,00011	-0,00007
	Relativní chyba [%]	-19,21	-12,73	-9,25	-5,30	-2,96
$T_0 = 85\text{ °C } \Delta T = 17\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00228	0,00278	0,00317	0,00378	0,00428
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	0,00086	0,00111	0,00130	0,00161	0,00186
	Relativní chyba [%]	37,74	39,94	41,16	42,58	43,43
$T_0 = 55\text{ °C } \Delta T = 13\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00108	0,00124	0,00136	0,00156	0,00172
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	-0,00034	-0,00043	-0,00050	-0,00061	-0,00070
	Relativní chyba [%]	-31,65	-34,69	-36,53	-38,85	-40,35
$T_0 = 40\text{ °C } \Delta T = 13\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00112	0,00133	0,00150	0,00177	0,00198
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	-0,00030	-0,00034	-0,00036	-0,00040	-0,00044
	Relativní chyba [%]	-26,93	-25,15	-24,13	-22,91	-22,16
$T_0 = 85\text{ °C } \Delta T = 13\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00109	0,00141	0,00165	0,00203	0,00235
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	-0,00033	-0,00026	-0,00021	-0,00014	-0,00007
	Relativní chyba [%]	-29,89	-18,67	-12,98	-6,72	-3,15
$T_0 = 35\text{ °C } \Delta T = 13\text{ °C}$	$P\Delta T^{-1}$	0,00151	0,00178	0,00199	0,00232	0,00258
	Absolutní chyba [WK ⁻¹]	0,00009	0,00011	0,00012	0,00015	0,00016
	Relativní chyba [%]	6,19	6,23	6,25	6,28	6,30



Obr. 5.13: Relativní chyba určeného matematického modelu vycházejícího z teoretických předpokladů

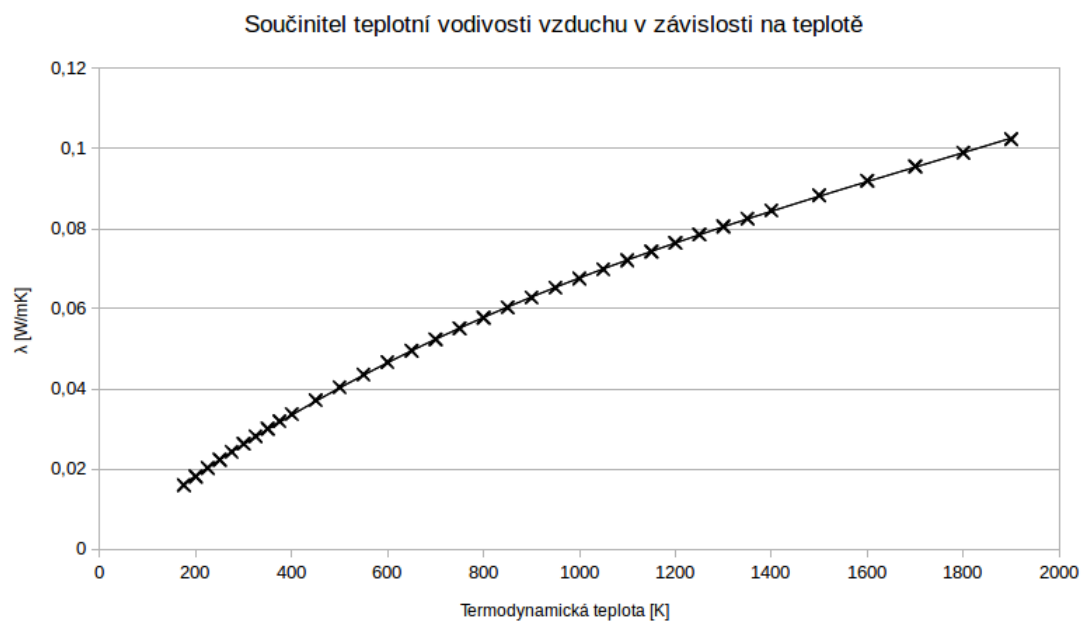
Závislé na teplotě jsou zejména parametry λ , ν a Pr , jak popisují grafy 5.14, 5.15 a 5.16. (Dry Air Properties, 2005)

Změřená závislost parametrů A a B na absolutní teplotě okolí získaná z tabulky 5.4 a 5.5 je zobrazena na grafu 5.17.

V pracovní oblasti snímače (275K - 375K) mohou být křivky 5.14, 5.15 a 5.16 linearizovány a dosazeny do analytických vztahů 2.10 a 2.11. Takto vzniklé závislosti koeficientů matematického modelu jsou zobrazeny na grafu 5.18. Maximální teoretická chyba parametrů v této oblasti je 23,3% pro parametr A a 1,6% pro parametr B.

Vzhledem k vysokým chybám a náročnosti při použití analytického modelu byl navržen alternativní model získaný experimentálně. Hodnoty z měření 5.1.2 byly analyzovány v programu MATLAB a určena závislost $v = f(T_H, T_0, P)$. Závislost 5.6 byla vytvořena proložením bodů polynomem 2. řádu.

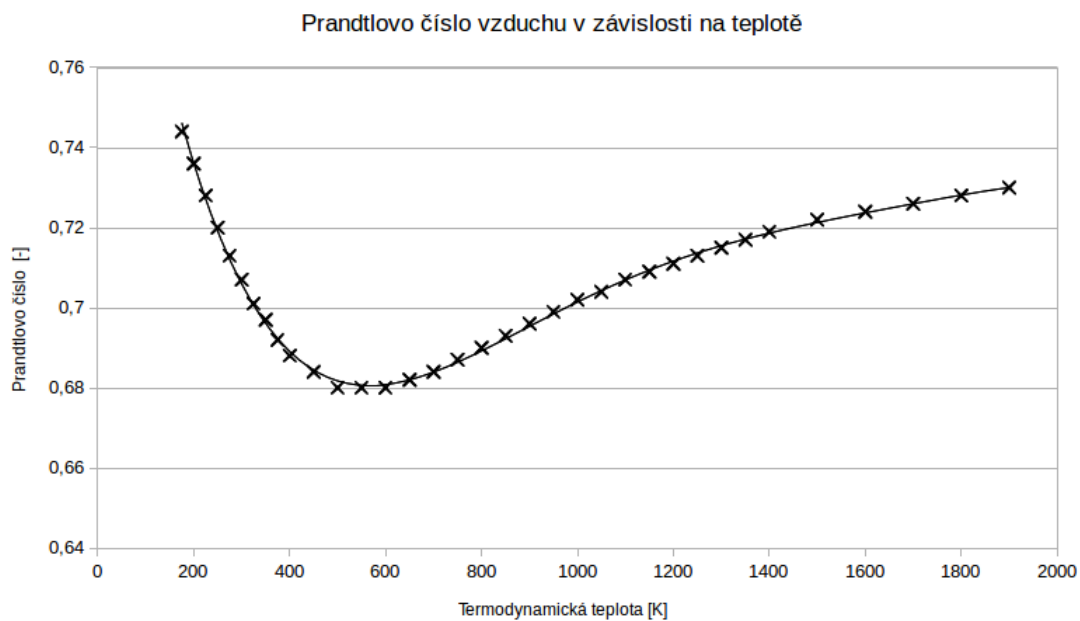
$$v = +2,211T_0 - 1,944T_H - 0,02188T_HT_0 + 2175P + 30,77PT_0 - 36,40PT_H - 11,55 - 13160P^2 + 0,02022T_H^2 - 0,001080T_0^2 \quad (5.6)$$



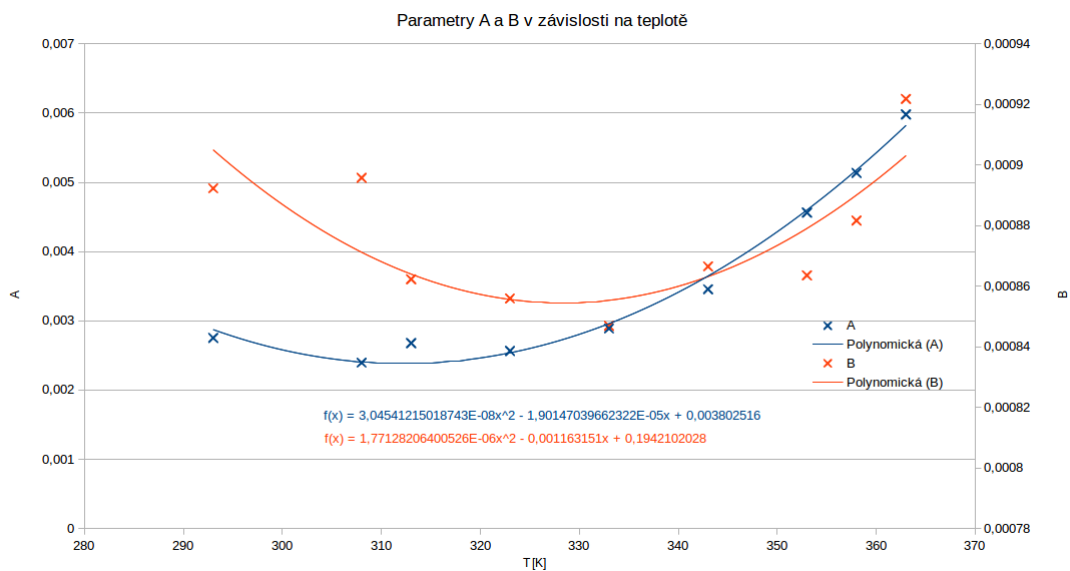
Obr. 5.14: Závislost součinitele teplotní vodivosti vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)



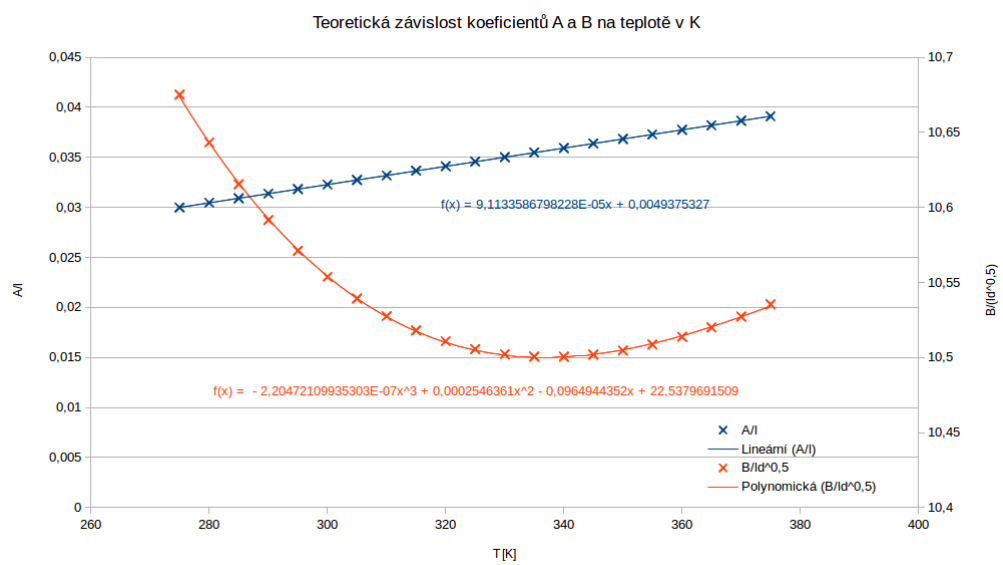
Obr. 5.15: Závislost kinematické viskozity vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)



Obr. 5.16: Závislost Prandtlava čísla vzduchu na teplotě (Dry Air Properties, 2005)



Obr. 5.17: Experimentálně zjištěná závislost parametrů A a B matematického modelu snímače na T_0



Obr. 5.18: Teoretická závislost parametrů A a B matematického modelu snímače na T_0

Tab. 5.9: Porovnání naměřených hodnot a vypočítaných hodnot pomocí modelu získaného proložením naměřených hodnot

P [W]	T_H [°C]	T_0 [°C]	v_{skut} [ms ⁻¹]	v_{vyp} [ms ⁻¹]	Abs. chyba [ms ⁻¹]	Rel. chyba [%]
0,0180	53,4340	40	4,1600	4,3110	0,1510	3,6299
0,0210	53,4630	40	6,6600	7,1131	0,4531	6,8033
0,0240	53,4560	40	10,3000	9,7271	-0,5729	-5,5622
0,0260	53,4910	40	13,2800	11,2754	-2,0046	-15,0946
0,0230	59,2100	40	2,2500	0,9585	-1,2915	-57,4006
0,0270	57,6220	40	4,1900	5,6148	1,4248	34,0038
0,0310	57,3830	40	6,7500	8,1836	1,4336	21,2381
0,0350	56,1970	40	10,3500	12,1085	1,7585	16,9902
0,0370	56,1940	40	13,4000	12,9401	-0,4599	-3,4324
0,0130	65,7920	55	2,0900	4,1933	2,1033	100,6348
0,0150	69,2510	55	4,2400	3,0738	-1,1662	-27,5055
0,019	68,6960	55	6,1800	7,2535	1,0735	17,3710
0,0230	68,8650	55	10,2800	10,3076	0,0276	0,2685
0,0250	69,3140	55	13,6500	11,1991	-2,4509	-17,9554
0,0180	71,3220	55	2,0000	3,8243	1,8243	91,2170
0,0220	74,9180	55	4,3000	3,2429	-1,0571	-24,5843
0,0280	73,1700	55	6,7000	8,1861	1,4861	22,1811
0,0340	73,3080	55	10,6800	10,3196	-0,3604	-3,3743
0,0360	72,3070	55	13,8700	12,3898	-1,4802	-10,6721
0,0090	93,9030	85	2,2200	1,0365	-1,1835	-53,3095
0,0110	92,8320	85	4,2100	3,7132	-0,4968	-11,8000
0,0140	92,3130	85	6,4600	7,2562	0,7962	12,3251
0,0210	95,1030	85	10,7800	11,8754	1,0954	10,1614
0,0220	95,160	85	13,2500	12,5531	-0,6969	-5,2597
0,0110	112,6370	85	2,2400	2,7486	0,5086	22,7058
0,0150	110,6170	85	4,0900	3,8089	-0,2811	-6,8719
0,0220	112,2750	85	5,9300	5,5901	-0,3399	-5,7320
0,0330	102,1840	85	10,8000	12,1086	1,3086	12,1169
0,0350	101,8080	85	13,5300	12,8193	-0,7107	-5,2528

5.2 Návrh HW

Zpracující elektroniku jsem se rozhodl navrhnout digitální z těchto důvodů

- Možnost digitálního výstupu snímače a digitální komunikace
- Možnost řídit spotřebu, uspávat snímač
- Možnost kalibrace na dálku
- Možnost numerické linearizace
- Méně rozšířená koncepce
- Snazší návrh

Pro zpracování dat jsem zvolil mikrokontrolér z řady MSP430 od firmy Texas Instruments, konkrétně MSP430FR2311. Pro snazší manipulaci, bez nutnosti vytvářet vlastní DPS, jsem zvolil vývojový kit MSP-EXP430FR2311, ale pro praktické využití snímače je pochopitelně nutné vytvořit vlastní DPS přímo určenou k tomuto účelu.

Podrobný popis vývojového kitu včetně schématu zapojení lze nalézt v technickém listu dostupném na <http://www.ti.com/lit/ug/slau664b/slau664b.pdf>.

5.2.1 Návrh HW IST FS7

Pro vyhodnocení odporu se využívá změna dělicího poměru odporového děliče viz schéma na obrázku 5.20. Hodnoty odporů jsem volil tak, aby změna napětí byla co největší a aby byl pokryt celý rozsah pracovních teplot snímače IST FS7 (-20°C - 150°C). Navržené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.10.

Tab. 5.10: Navržené hodnoty rezistorů pro snímač IST FS7

T [°C]	-20	150
$R_H[\Omega]$	41	71
$R_{HP} = 51\Omega$ $U_{výst}$ [V]	1,83	1,38
$R_S[\Omega]$	1107	1893
$R_{SP} = 1300\Omega$ $U_{výst}$ [V]	1,78	1,34
$R_{D1}[\Omega]$ 39000	U_{REF+} [V] 1,84	
\Rightarrow		
$R_{D2}[\Omega]$ 13000	U_{REF-} [V] 1,35	
\Rightarrow		
$R_{D3}[\Omega]$ 36000		

Průběh výstupu AD převodníku (ADC) v závislosti na teplotě topného tělíska,

respektive snímače teploty je zobrazen na obrázku 5.19. Je patrné, že snímačem teploty není pokryta celá teplotní pracovní oblast snímače (-20°C - 150°C), protože při návrhu byly využity rezistory standardizované řady E24 a předpokládá se, že teplota topného tělíska bude vyšší než teplota snímače. Přepočet výstupu ADC na teplotu popisuje vztah 5.7.

$$\begin{aligned} U_R &= ADC \frac{0,49}{1024} + 1,35 \\ R &= \frac{3,3R_P}{U_R} - R_P \\ T &= \frac{R - R_0}{0,00385R_0} \end{aligned} \quad (5.7)$$

U_R napětí na výstupu děliče

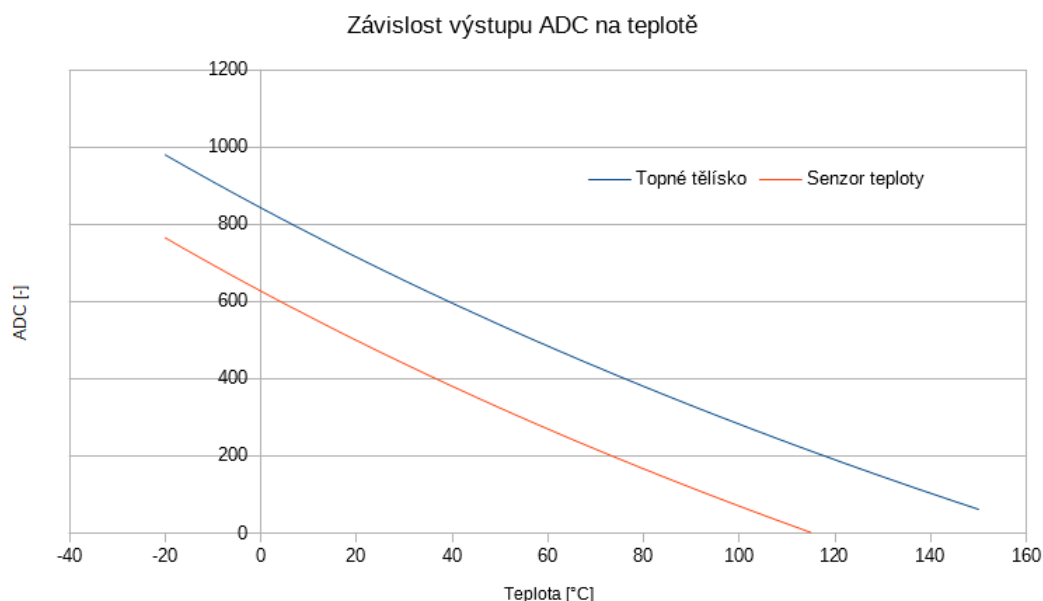
ADC výstupní hodnota ADC

R odpor závislý na teplotě (R_H nebo R_S)

R_P pomocný odpor napěťového děliče (R_{HP} nebo R_{SP})

R_0 odpor závislý na teplotě (R_H nebo R_S) při $T = 0^{\circ}\text{C}$

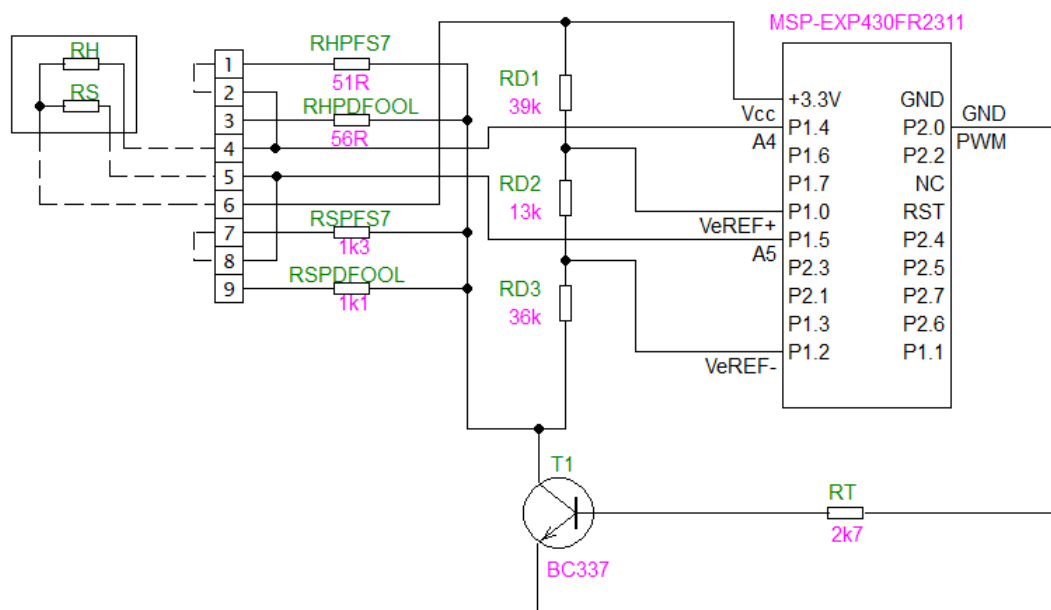
T teplota odporu závislého na teplotě (T_H nebo T_S)



Obr. 5.19: Závislost výstupu ADC na teplotě topného tělíska T_H nebo snímače teploty T_S

Zapojení tvoří celkem tři větve - větev s teplotním snímačem, větev s topným tělískem a větev s napěťovými referencemi. Větve jsou zapojeny paralelně. To zajišťuje,

že na všech třech větvích je schodné napětí a dojde-li k jeho mírné změně, jsou změněny i napěťové reference. Regulace napětí na topném tělisku je provedena pomocí PWM, kterou je ovládán tranzistor, ten pak spíná všechny tři větve najednou.



Obr. 5.20: Schéma zapojení modulu pro vývojový kit MSP-EXP430FR2311

Zapojení modulu (viz 5.20) je univerzální pro snímač IST FS7 i snímač IST DFOOL. Pro snímač IST FS7 musí být propojeny piny 1-2 a 7-8 na svorkovnici pomocí jumperů. Pro snímač IST DFOOL se propojují piny 2-3 a 8-9. Snímač se propojuje následovně: pin 4 topné tělisko, pin 5 snímač teploty média, pin 6 zem snímače.

5.2.2 Návrh HW IST DFOOL

Návrh pro snímač IST DFOOL vychází z návrhu pro snímač IST FS7. Za účelem co největší záměnnosti DPS byly navrženy odporové děliče tak, aby mohly být použity stejné napěťové reference. Rozdíl mezi zapojením pro IST FS7 a IST DFOOL je pouze v hodnotách dvou rezistorů ve větvi s teplotním snímačem a ve větvi s topným těliskem a může být vytvořena univerzální DPS, kde se snímač volí pomocí jumperů. Navržené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.11.

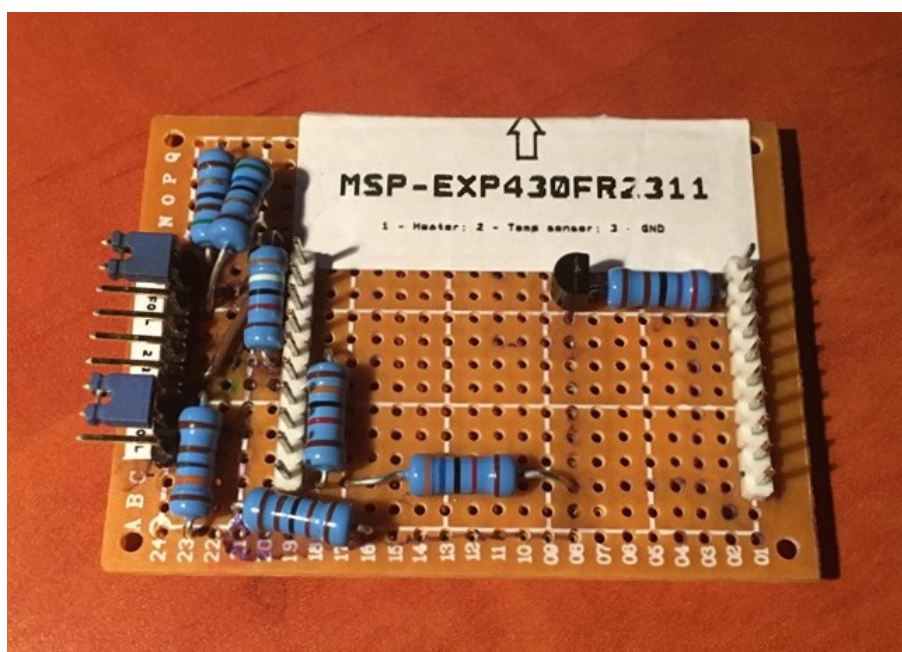
Výsledný HW

Na základě návrhu byl zkonstruován modul k vývojovému kitu MSP-EXP430FR2311. Modul je tvořen univerzální deskou plošného spoje, na které je zrealizovaný obvod

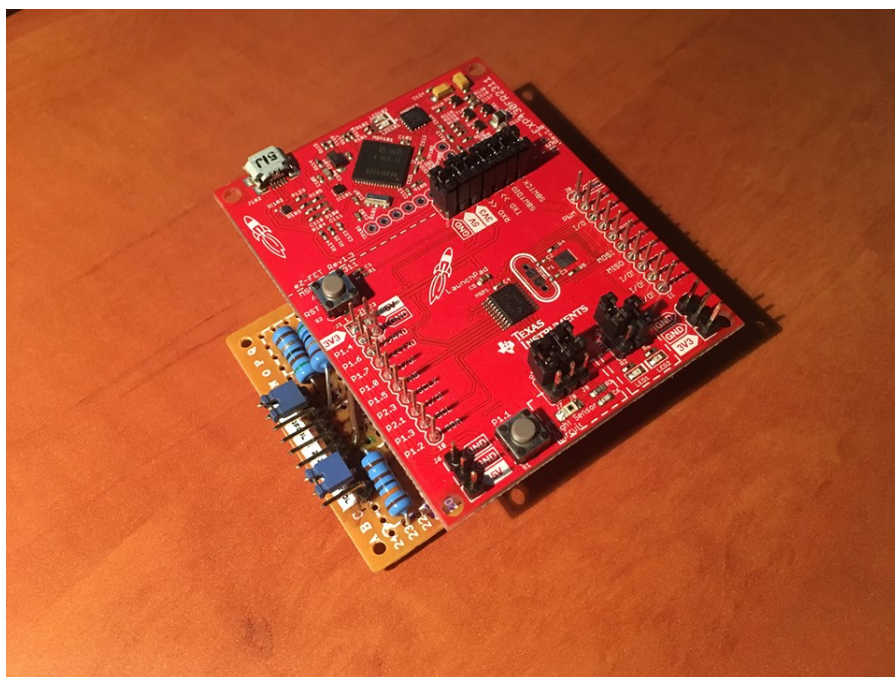
Tab. 5.11: Navržené hodnoty rezistorů pro snímač IST DFOOL

T [°C]	-20	150
$R_H[\Omega]$	46	79
$R_{HP} = 56\Omega$ $U_{výst}$ [V]	1,81	1,37
$R_S[\Omega]$	923	1578
$R_{SP} = 1100\Omega$ $U_{výst}$ [V]	1,79	1,36
$R_{D1}[\Omega]$ 39000 \Rightarrow	U_{REF+} [V]	1,84
$R_{D2}[\Omega]$ 13000 \Rightarrow		
$R_{D3}[\Omega]$ 36000	U_{REF-} [V]	1,35

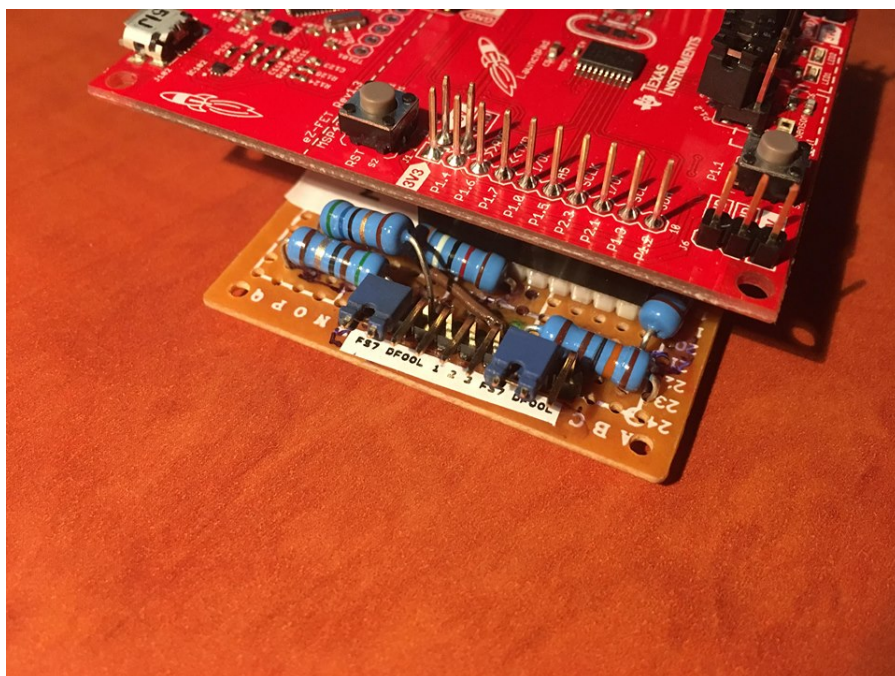
5.20. Celý vývojový kit se nasune na tento modul tak, aby šipka na modulu ukazovala na horní hranu vývojového kitu. Na levé straně modulu je vyveden konektorový hřebínek, kde se volí pomocí dvou propojek zda je použit snímač IST FS7 (propojené piny 1-2 a 7-8) nebo IST DFOOL (propojené piny 2-3 a 8-9) a připojuje snímač na piny 4 - R_H , 5 - R_S a 6 - GND . Zkonstruovaný modul je zobrazen na obrázcích 5.21, 5.22, 5.23.



Obr. 5.21: Modul pro vývojový kit MSP-EXP430FR2311



Obr. 5.22: Modul s nasunutým vývojovým kitem MSP-EXP430FR2311



Obr. 5.23: Detail konektorového hřebínku s navoleným snímačem IST FS7

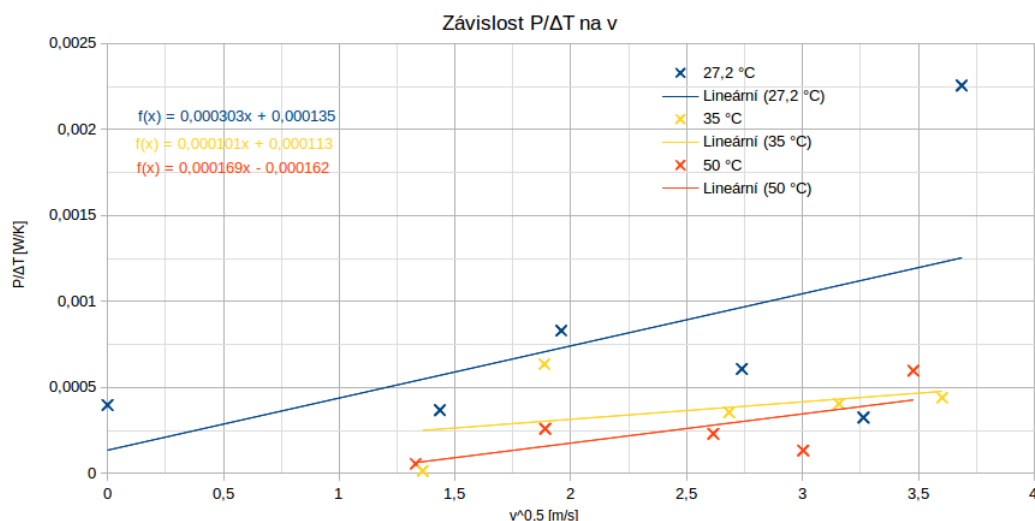
5.2.3 Ověření výsledného návrhu

Protože nominální a skutečné hodnoty použitých součástek se můžou mírně lišit, provedl jsem měření za účelem zjištění skutečných hodnot.

Tab. 5.12: Porovnání Nominálních a skutečných hodnot

Veličina	Nominální (teoretická hodnota)	Skutečná hodnota
R_{HP} [Ω]	51	50,06
R_{SP} [Ω]	1300	1293
U_{REF+} [V]	1,84	1,840
U_{REF-} [V]	1,35	1,351

S navrženým prototypem bylo provedeno i základní ověřovací měření viz tab 5.13 a graf 5.24. Naměřené průběhy pro teplotu okolí 27,2°C a 35°C vycházejí řádově stejně, jako průběhy v grafu 5.12, pro průběh při teplotě 50°C vychází bias záporný, to je ovšem nereálné.



Obr. 5.24: Závislost $P\Delta T^{-1}$ na průtoku v

5.3 Návrh SW

SW pro mnou realizovaný průtokoměr se skládá ze dvou částí. Programu mikrořadiče MSP430FR2311 a skriptu pro výpočetní program MATLAB R2016a. Toto řešení jsem zvolil kvůli nedostatečné paměti mikrořadiče, jednoduššímu ladění matematického modelu a jednoduššímu odečítání hodnot. Mikrořadič obstarává regulaci teploty topného tělíska a odečítání hodnot napětí z měřících děličů. Hodnoty jsou

Tab. 5.13: Tabulka naměřených hodnot pro snímač IST FS7 s navrhnutým HW

Vyhříváno na: $T_0 = 27,2\text{ °C}$						
$v\text{ [ms}^{-1}\text{]}$	0	2,06	3,84	7,5	10,65	13,6
U	1,32	0,99	1,716	1,584	1,254	3,234
$U_{SP}\text{ [V]}$	1,440	1,559	1,575	1,594	1,601	1,606
$U_{HP}\text{ [V]}$	1,430	1,562	1,567	1,577	1,575	1,583
$R_S\text{ [}\Omega\text{]}$	1678,7771	1451,1552	1423,3132	1392,0691	1379,7069	1370,7136
$R_H\text{ [}\Omega\text{]}$	66,6125	56,6776	56,3827	55,7047	55,8414	55,3344
$T_S\text{ [°C]}$	103,6314	54,3626	48,3362	41,5734	38,8976	36,9510
$T_H\text{ [°C]}$	124,7476	67,4032	65,7012	61,7878	62,5768	59,6500
$\Delta T_S\text{ [K]}$	21,1162	13,0406	17,365	20,2144	23,6792	22,699
$P\text{ [W]}$	0,00839	0,00479	0,0144	0,0123	0,00769	0,0512
$P\Delta T_S^{-1}$	0,000397	0,000367	0,000829	0,0607	0,000325	0,00225
Vyhříváno na: $T_0 = 35\text{ °C}$						
$v\text{ [ms}^{-1}\text{]}$		1,85	3,56	7,2	9,97	12,98
U		0,33	0,858	1,32	1,32	1,386
$U_{SP}\text{ [V]}$		1,503	1,531	1,586	1,582	1,585
$U_{HP}\text{ [V]}$		1,457	1,554	1,560	1,564	1,567
$R_S\text{ [}\Omega\text{]}$		1553,505	1501,2051	1404,6147	1411,3146	1405,9088
$R_H\text{ [}\Omega\text{]}$		64,4760	57,2760	56,8340	56,5783	56,4172
$T_S\text{ [°C]}$		76,5163	65,1959	44,2889	45,7391	44,5690
$T_H\text{ [°C]}$		112,4158	70,8570	68,3062	66,8302	65,9000
$\Delta T_S\text{ [K]}$		35,8995	5,6611	24,0173	21,0911	21,331
$P\text{ [W]}$		0,000527	0,00360	0,00852	0,00852	0,009392
$P\Delta T_S^{-1}$		$1,467 \cdot 10^{-5}$	0,000635	0,000354	0,000404	0,00044
Vyhříváno na: $T_0 = 50\text{ °C}$						
$v\text{ [ms}^{-1}\text{]}$		1,77	3,57	6,84	9,02	12,1
U		0,528	1,32	1,188	0,924	1,452
$U_{SP}\text{ [V]}$		1,514	1,482	1,529	1,541	1,493
$U_{HP}\text{ [V]}$		1,493	1,446	1,495	1,502	1,490
$R_S\text{ [}\Omega\text{]}$		1533,8126	1594,8640	1505,3825	1483,6089	1572,5282
$R_H\text{ [}\Omega\text{]}$		61,7398	65,4217	61,5975	61,0156	61,9412
$T_S\text{ [°C]}$		72,2538	85,4684	66,1001	61,3872	80,6338
$T_H\text{ [°C]}$		96,6224	117,8743	95,8010	92,4421	97,7846
$\Delta T_S\text{ [K]}$		24,3686	32,4059	29,7009	31,0549	17,1508
$P\text{ [W]}$		0,00135	0,008410	0,00686	0,00415	0,0102
$P\Delta T_S^{-1}$		$55,57 \cdot 10^{-06}$	0,00026	0,000231	0,000134	0,000597

odesílány pomocí rozhraní UART. K UART rozhraní se lze připojit pomocí USB převodníku, integrovaného na vývojovém kitu, jako k sériovému komunikačnímu portu z PC. Skript programu MATLAB R2016a přijímá data po sériové lince a poté dále matematicky zpracovává. Toto řešení je vhodné pouze pro vývojové účely. Pro praktická nasazení by bylo vhodné i matematické zpracování zakomponovat do programu mikrořadiče.

5.3.1 Komunikační protokol

Prostřednictvím sériové komunikační linky se odesílají řetězce znaků dle ASCII rychlostí 115200 Bd/s, kde první znak určuje typ hodnoty, následuje hodnota a ukončující znak "\n". Znak určující typ hodnoty může být U pro střidu PWM, S pro napětí na děliči snímače teploty nebo H pro napětí na děliči topného tělíska.

5.3.2 Popis programu mikrořadiče s regulací na konst. ΔT

Program mikrořadiče je psaný v jazyce C a využívá knihovnu "msp430.h". Po úvodní inicializaci provádí nekonečný cyklus, ve kterém je prováděna kontrola proměnné "Flags1", ve které je nastaven bit 0 v rámci přerušení časovače. Pokud je bit 0 nastaven, zavolá se funkce "readvalues", "controller" a nastaví se nová hodnota střidy PWM (SysIN).

Funkce readvalues provede sekvenci přepnutí střidy PWM na 100% , odečtení hodnoty ADC, navrácení PWM na původní střidu a odeslání odečtené hodnoty. Tuto sekvenci provede pro hodnotu výstupního napětí děliče snímače teploty a poté znovu pro hodnotu výstupního napětí děliče topného tělíska. Nakonec vynuluje bit 0 proměnné "Flags1".

Funkce "controller" je regulátor, který reguluje na konstantní rozdíl mezi hodnotami výstupního napětí na děličích snímače teploty a topného tělíska o hodnotě uložené v proměnné ReqDT.

V programu jsou použity tyto významné proměnné:

- char Flags1 - proměnná s příznaky, bit0 je nastavován po uplynutí časového intervalu
- short ActDT - aktuální nestandardizovaný rozdíl teplot topného tělíska a snímače teploty (ΔT)
- short const ReqDT - požadovaný destandardizovaný rozdíl teplot topného tělíska a snímače teploty
- unsigned short SysIN - střída PWM v %

5.3.3 Popis programu mikrořadiče s regulací na konst. T_H

Program s regulací na konstantní T_H je prakticky totožný s programem, který reguluje na konstantní ΔT . Rozdíl je ve funkci "controller", kde regulátor reguluje na $ActTH = ReqTH$.

V programu jsou změněny tyto proměnné:

- short ActTH nahrazuje short ActDT - proměnná obsahuje aktuální nestandardizovanou teplotu T_H
- short ReqTH nahrazuje short ReqTH - konstantní proměnná obsahuje požadovanou nestandardizovanou teplotu topného tělíska T_H

5.3.4 Popis skriptu programu MATLAB

Skript v jazyce MATLAB překontroluje, zda není otevřena sériová komunikace z předešlého běhu skriptu. Pokud ano, ukončí ji. Poté proběhne inicializace a zahájení nekonečného cyklu. V cyklu se přijme řetězec po sériové lince, identifikuje, extrahuje a standardizuje se hodnota do dané proměnné dle komunikačního protokolu. Po ověření validity hodnot přijatých po sériové lince se provádí filtrace dle vztahu 5.8:

$$a_n = 0.9a_{n-1} + 0.1x \quad (5.8)$$

Dále následuje výpočet rychlosti na základě matematického modelu 5.5 a filtrace vypočtené rychlosti opět dle vztahu 5.8. Pokud rychlost nabývá nereálných hodnot (NaN, Inf, $v < 0$), dojde k vynulování hodnoty.

Aby se zvýšila přehlednost výpisu dat, je s každou iterací cyklu inkrementován čítač, který po načítání hodnoty uložené v proměnné dispfrec povolí prezentaci naměřených dat.

Ve skriptu jsou použity tyto významné proměnné:

- s - parametry sériové komunikace
- dispfrec - frekvence zobrazování naměřených a vypočtených hodnot
- A a B - koeficient A, respektive B matematického modelu
- port - port sériové komunikace
- U, U_{nef} - napětí generované PWM po a před filtrací
- U_{Sp}, U_{Hp} - napětí na pomocném měřicím rezistoru ve snímačové větvi respektive ve větvi topného tělíska
- v, v_{nef} - vypočítaná rychlost proudění po filtraci respektive před filtrací
- TH_{nef}, TH, TS_{nef}, TS - vypočítaná teplota topného tělíska respektive snímače před a po filtraci

- R_{S0} , R_{H0} - odpor snímače teploty respektive topného tělíska při 0°C
- R_{Sp} , R_{Hp} - odpor pomocného měřicího rezistoru ve větvi se snímačem respektive s topným tělískem
- V_{REFn} , V_{REFp} - V_{REF-} respektive V_{REF+}
- V_{cc} - napájecí napětí měřicí větve

5.4 Alternativa s regulací na konstantní hodnotu

Pro zjednodušení snímače byl mírně upraven program mikrořadiče tak, aby byla teplota topného tělíska regulována na konstantní teplotu 50°C a provedeno ověřovací měření.

Postup měření

Při měření byl použit stejně modifikovaný laboratorní přípravek do předmětu BMFV jako v předešlých měřeních. Jako referenční průtokoměr byl použit termoanemometr Voltcraft PL-135HAN na vstupu soustavy a na výstupu byl umístěn snímač IST FS7 s mnou navrženou zpracující elektronikou. Zpracující elektronika regulovala teplotu topného tělíska a odečtené hodnoty odesílala po sériové lince do PC. Pro měření teploty proudícího vzduchu byl využit termočlánek s multimetrem UNI-T UT804.

Výsledky z měření

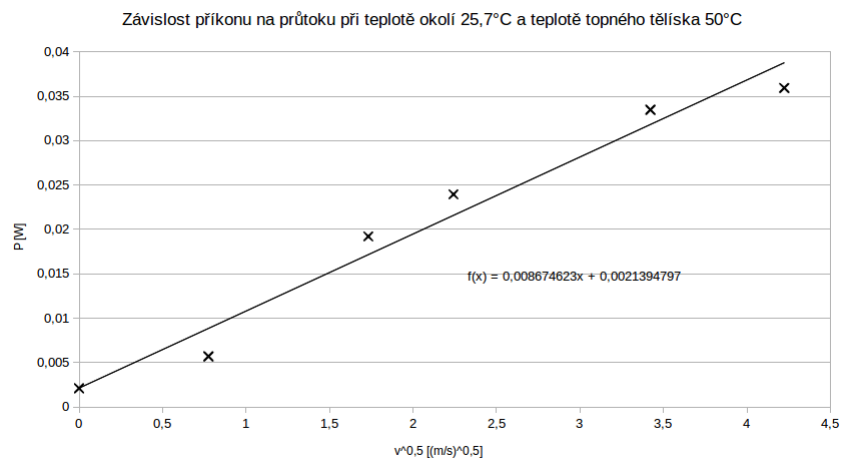
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.14 a zobrazeny na obrázku 5.25.

Tab. 5.14: Naměřené hodnoty příkonu topného tělíska při vyhřívání na teplotu 50°C při teplotě okolí $25,7^{\circ}\text{C}$

$v \text{ [ms}^{-1}\text{]}$	0	0,6	3	5,03	11,71	17,84
U	0,655	1,0787	1,98	2,211	2,6138	2,7084
$R_H \text{ }[\Omega]$	55,2025	54,6935	53,5137	53,5139	53,5139	53,5380
$T_H \text{ }[^{\circ}\text{C}]$	58,8891	55,9510	49,1409	49,1421	49,1421	49,2812
$\Delta T_0 \text{ [K]}$	33,1891	30,251	23,4409	23,4421	23,4421	23,5812
$P \text{ [W]}$	0,002099	0,005697	0,01921	0,02395	0,03347	0,0359

Závěr z měření

Z výsledku měření a v průběhu měření jsem zjistil, že při vyhřívání topného tělíska na konstantní teplotu dojde k omezení rozsahu. Zvolí-li se rozdíl teploty topného tělíska a teploty okolí příliš malý, sníží se citlivost snímače a zvýší se obtížnost regulace



Obr. 5.25: Závislost příkonu topného tělíska při vyhřívání na teplotu 50°C při teplotě okolí 25,7°C

teploty. Navíc se více omezí horní teplotní rozsah. Naopak zvolí-li se rozdíl teploty topného tělíska a teploty okolí příliš velký, je nutné dodat vyšší výkon topnému tělísku, to způsobuje problém zejména pro vyšší průtoky.

6 ZÁVĚR

V rámci mé bakalářské práce byl modifikován laboratorní přípravek do předmětu BMFV tak, že na vstup byl připevněn pomocí bajonetové rychlospojky krátký kus hadice, ve kterém byl otvor pro zastrčení sondy termoanemometru Voltcraft PL-135HAN. Výstup byl modifikován tak, že byla odmontována část ihned za topením a nahrazena trubkou z PMMA, která byla nasunuta na hadicový trn pomocí přechodky z hadice. Do PMMA trubky byl umístován snímač IST FS7. Výsledná sestava je patrná z obrázku 5.5. Výhodou této sestavy je, že termoanemometr Voltcraft PL-135HAN není ovlivňován vyhříváním vzduchu. To je velmi významná výhoda, protože provozní teplotní rozsah termoanemometru Voltcraft PL-135HAN je pouze 0°C až 50°C. Dalším vylepšením je vynechání kovových dílů a zkrácení vzdálenosti mezi testovaným snímačem, tedy IST FS7, a topením. To umožňuje pohodlnější a přesnější nastavení teploty a snižuje riziko přehřátí topení.

Ve své bakalářské práci jsem také navrhl prototyp zpracující elektroniky využívající vývojový kit MSP-EXP430FR2311 včetně SW. Tento prototyp umožňuje měření se snímačem IST FS7 i snímačem IST DFOOL (lze nastavit pomocí jumperů). Prototyp zprostředkovává regulaci teploty topného tělíska, odečítání hodnot a jejich odesílání po sériové lince. Pro prototyp byly vytvořeny dvě verze programu lišící se požadovanou teplotou topného tělíska. V první verzi je topné tělísko vyhříváno na konstantní rozdíl teploty tělíska a teploty okolí (snímače) ΔT_S . Při větších průtocích může dojít k mírnému zmenšení ΔT_0 . Druhá verze programu reguluje teplotu topného tělíska na konstantní absolutní teplotu. V tomto případě dochází ke snížení teplotního, případně rychlostního rozsahu snímače. Prototyp se snímačem IST FS7 lze využít pro měření průtoku až do rychlosti $v = 15 \text{ ms}^{-1}$. Chování prototypu se snímačem IST DFOOL nemohlo být ověřeno, protože snímače nebyly včas dodány. Pro zpracování naměřených dat prototypem byl vytvořen skript v programu MATLAB. Pro praktické využití by bylo vhodné použít výkonnější mikrořadič s větší pamětí a zahrnout zpracování dat pouze do programu mikrořadiče. Dále by bylo vhodné rozšířit a implementovat komunikační protokol tak, aby mohly být konstanty (DT, A, B) předávány po sériové lince.

Při měření se snímačem IST FS7 se projevila nedokonalost snímače teploty spočívající v ovlivnění měření teploty teplotou topného tělíska a vliv odporu přírodních vodičů. Nejjednodušší metoda odstranění této nedokonalosti je využití nezávislého snímače teploty proudícího média.

Pokus o návrh matematického modelu snímače jsem provedl dvěma způsoby. První způsob spočíval v nalezení parametrů analytického vztahu, Kingova zákona, z naměřených závislostí. Druhý způsob spočíval v proložení naměřených závislostí $v = f(P, T_H, T_0)$ polynomem. Matematické modely vzniklé oběma způsoby vykazují

značnou chybu zřejmě způsobenou rozptylem vstupních dat. Proto by bylo vhodné pro konkrétní praktické využití snímače provést kalibrační měření za účelem získání většího množství přesnějších dat a z nich následně určit matematický model. Pro získání kvalitnějších výsledků měření je nutné použít přesnější referenční průtokoměr, případně i kvalitnější regulaci teploty média.

LITERATURA

CRABTREE, Michael Anthony, 2009. *Industrial Flow Measurement*. University of Huddersfield. Disertace. University of Huddersfield.

Dry Air Properties, 2005. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html

SMOL'YAKOV, Aleksandr Vladimirovich a Viktor Mikhailovich TKACHENKO, 1983. *The Measurement of Turbulent Fluctuations: An Introduction to Hot-Wire Anemometry and Related Transducers*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-81985-8.

ORLÍKOVÁ, Soňa, 1999-. Metoda zvonu. In: *Elektrorevue: časopis pro elektrotechniku* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 24.1.2001 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01004/image010.gif>

INTEGRATED DEVICE TECHNOLOGY, *ZSSC3154 Application Note: Mass Air Flow (MAF) Sensor*, 2016. San Jose (CA, USA).

INTEGRATED DEVICE TECHNOLOGY, *FS1012 Datasheet: Gas and Liquid Flow Sensor Module*, 2017. San Jose (CA, USA).

ZHU, Yanqing, Bei CHEN, Ming QIN a Qing-An HUANG, 2014. 2-D Micromachined Thermal Wind Sensors - A Review. *IEEE Internet of Things Journal* [online]. 1(3), 216-232 [cit. 2017-12-27]. DOI: 10.1109/JIOT.2014.2319296. ISSN 2327-4662. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6803871/>

LIPTÁK, Béla G., 2012. *Instrument engineers' handbook: Process Control and Optimization*. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 9780849310812.

KADLEC, Karel, 1994-. Snímače průtoku — principy, vlastnosti a použití: část 1. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public., 2006(10), 5-9. ISSN 1210-9592.

ROGER C. BAKER., 2000. *Flow Measurement Handbook Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. 2. vydání. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780511471100.

CTAprobe2014, 2017. In: *Dantec Dynamics* [online]. Skovlunde (Denmark): Dantec Dynamics [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/cta/CTAprobe2014.jpg>

IST FS5, 2017. In: *Farnell* [online]. Leeds (England): Farnell [cit. 2017-12-27].
Dostupné z: http://uk.farnell.com/productimages/standard/en_GB/126695207-40.jpg

BRUUN, H.H., 1996. *Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis*. 2 ed.
Oxford: Oxford University Press/. ISBN 9780198563426.